

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID**

**ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR**



**Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de  
Telecomunicación**

## **TRABAJO FIN DE GRADO**

**DISEÑO DE LA RED DE ALIMENTACIÓN PARA UN  
ARRAY DE ANTENAS PARA COMUNICACIONES POR  
SATÉLITE**

**Roberto Garrote Moreno**  
**Tutor: Miguel Alejandro Salas Natera**  
**Ponente: José Luís Masa Campos**

**Julio 2018**



# **DISEÑO DE LA RED DE ALIMENTACIÓN PARA UN ARRAY DE ANTENAS PARA COMUNICACIONES POR SATÉLITE**

**AUTOR: Roberto Garrote Moreno**  
**TUTOR: Miguel Alejandro Salas Natera**

**Dpto. de Tecnologías Electrónicas y de Comunicaciones**  
**Escuela Politécnica Superior**  
**Universidad Autónoma de Madrid**  
**Julio de 2018**



# Resumen

En este Trabajo de Fin de Grado se ha llevado a cabo el desarrollo de un elemento radiante multibanda, para bandas de trabajo K y Ka conocidas en sistemas de comunicaciones por satélite (SATCOM) como banda Ka para recepción y transmisión, respectivamente. El elemento radiante propuesto cuenta con una única apertura para ambas bandas, mediante el uso de una cavidad circular, empleando en primer lugar un filtro iris realizado con anillos circulares, con un parche polarizador en la apertura, pasando después a modificar en dicho filtro los anillos por elementos resonantes formados por secciones tipo C, y pasando a una mejora final en la que se sustituye el elemento en la apertura por un polarizador ajustable en frecuencia y una carga dieléctrica que adapte la impedancia dentro de la cavidad con el nuevo polarizador.

Una vez alcanzado dicho objetivo se pasa al estudio y diseño de dos redes de alimentación lo más sencillas posibles, que pueden ser utilizadas de manera independiente o también se pueden combinar en función de las necesidades de la situación en la que se emplee el elemento radiante.

Se concluye analizando los resultados y viendo en que aspectos se han obtenido unos resultados positivos y en cuales se han de mejorar en trabajos futuros.

# Abstract

In this Bachelor Thesis we are going to study and design a multiband radiant element, for the K and Ka work bands, known in satellite system communication(SATCOM) the Ka band for reception and K band for transmission.the radiant element consists with an one only aperture, with the use of a circular cavity, using at first an Iris filter, made with circular rings of copper, with a polarizator patch in the aperture, after this study we will going to modified the filter substituting the circular rings by resonant elements made with C sections, and in the end we are going to make one more improve by substituting the patch polarizator of the aperture with an adjustable in frequency polarizator and adding a dielectric load that adapts the impedance between the cavity and the new polarizator.

Once we reached this target we pass to make the study and design of two feed nets as simple as possible, that can be used independently or it can be combined into each other in function to the needs of the situation in which the elements will be used.

We finished the work analyzing the results and looking in which aspects we have a good result and in which ones we can improve in future works.

# Palabras clave

Guía de onda, Elemento radiante, Banda K, Banda Ka, Filtro multicapa en cavidad, Resonador, Stub, Red de alimentación, Parámetros S, Diagrama de radiación, Relación axial, Stripline.

## **Keywords**

Waveguide, Radiating element, K band, Ka band, Multilayer filter in waveguide structure, Resonator, Stub, Feed net, S parameters, Radiating diagram, Axial relation, Stripline.



## ***Agradecimientos***

Me gustaría comenzar dándole las gracias a mi tutor, Miguel A. Salas Natera por haberme dado la oportunidad de realizar este TFG con él, habiendo tenido la paciencia y la buena voluntad de ayudarme en cada momento en que he necesitado de su ayuda, ha sido un trabajo duro, pero sin duda ha valido la pena el aprendizaje obtenido a su lado.

También me gustaría dar las gracias a todos los profesores que han impartido sus asignaturas de forma entusiasmada para que nosotros, los alumnos, nos enganchemos a sus asignaturas y clases.

A todos los compañeros que he tenido la suerte de conocer a lo largo de estos años, especialmente tengo que nombrar a Julio y Antonio, quienes más que compañeros de mil batallas, son amigos con los que las horas de laboratorio y estudio se han llevado de una manera inmejorable.

Tampoco puedo olvidar a mis amigos de siempre, espacialmente a Rubén, que ha sido ese amigo que siempre me ha escuchado en los malos momentos y hemos reído en los buenos.

Por supuesto, le doy las gracias a mis padres y mi hermana, que siempre me han apoyado y me han enseñado que la única manera de conseguir los objetivos es a base de trabajo y esfuerzo, a Raquel que ha sido un gran apoyo en los momentos difíciles dándome todo su ánimo y confianza.

En último lugar me quiero acordar de mi abuelo Andrés, que seguro estaría feliz de ver que finalmente he alcanzado el objetivo que me propuse.

Muchas gracias a todos.

18 Mayo de 2018.





# INDICE DE CONTENIDOS

<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 MOTIVACIÓN .....	1
1.2 OBJETIVOS.....	1
1.3 ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA .....	2
<b>2 ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>3</b>
2.1 TENDENCIAS ACTUALES .....	3
2.1.1 Elementos radiantes .....	3
2.2 MARCO TEÓRICO .....	4
2.2.1 Filtros Iris.....	4
2.2.2 Stub .....	5
2.2.3 Guía de onda .....	5
2.2.4 Resonador .....	6
2.2.5 Parámetros S.....	6
2.2.6 Polarización .....	6
2.2.7 Relación axial .....	8
<b>3 DISEÑO ELEMENTO RADIANTE .....</b>	<b>9</b>
3.1 DEFINICIÓN DE LA CAVIDAD .....	10
3.2 FILTRO DE IRISES EN CAVIDAD .....	11
3.2.1 Filtro Iris con secciones tipo C .....	16
3.3 ELEMENTO FINAL .....	17
<b>4 RED DE ALIMENTACIÓN .....</b>	<b>22</b>
4.1 ALIMENTACIÓN DEL ELEMENTO RADIANTE .....	22
4.2 COMPONENTES DE LA RED DE ALIMENTACIÓN PROPUESTA .....	22
4.2.1 Red de alimentación banda K .....	23
4.2.2 Red de alimentación banda Ka .....	25
4.2.3 Configuraciones de las Redes.....	27
4.3 ALIMENTACIÓN DE ARRAY .....	28
<b>5 CONCLUSIONES.....</b>	<b>30</b>
<b>6 LÍNEAS FUTURAS.....</b>	<b>31</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>33</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>I</b>
A GUÍA DE ONDA CIRCULAR .....	I
B ADAPTADORES $\lambda/4$ .....	- I -

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1: FILTROS IRIS [7], A) EN ALUMINIO POR MICRO LASER O MECANIZADO, Y B) MULTICAPA POR TECNOLOGÍA DE CIRCUITOS IMPRESOS .....	4
FIGURA 2-2: GEOMETRÍA IRIS .....	4
FIGURA 2-3: CIRCUITOS SERIE Y PARALELO STUB [9] .....	5
FIGURA 2-4: MODO TE <sub>10</sub> EN GUÍA RECTANGULAR.....	5
FIGURA 2-5: MATRIZ S [10] .....	6
FIGURA 2-6: POLARIZACIÓN LINEAL [11].....	7
FIGURA 2-7: POLARIZACIÓN CIRCULAR [11].....	7
FIGURA 2-8: POLARIZACIÓN ELÍPTICA [11].....	8
FIGURA 3-1: DISEÑO ELEMENTO RADIANTE.....	9
FIGURA 3-2: GUÍA DE ONDA CIRCULAR DEL DISEÑO.....	10
FIGURA 3-3: PROPAGACIÓN MODO TE <sub>11</sub> .....	10
FIGURA 3-4:PROPAGACIÓN MODO TM <sub>01</sub> .....	11
FIGURA 3-5:PROPAGACIÓN MODO TE <sub>21</sub> .....	11
FIGURA 3-6: ESQUEMA DEL ELEMENTO RADIANTE CON FILTROS DE IRISES EN CAVIDAD. A) CORTE DEL ELEMENTO RADIANTE, Y B) IMAGEN DE EXPLOSIÓN ISOMÉTRICA DEL ELEMENTO RADIANTE .....	11
FIGURA 3-7: ADAPTACIONES DISEÑO I: A) RADIO 0.9 MM, B) RADIO 0.8 MM, Y C) RADIO 0.7 MM .	13
FIGURA 3-8: CAMPO LEJANO BANDA K POLARIZACIÓN CIRCULAR A DERECHAS ( $\Phi = 90^\circ$ ).....	13
FIGURA 3-9: CAMPO LEJANO BANDA KA POLARIZACIÓN CIRCULAR A DERECHAS ( $\Phi = 90^\circ$ ).....	14
FIGURA 3-10: COMPONENTES CO-POLAR Y CONTRA-POLAR DEL CAMPO LEJANO BANDA K POLARIZACIÓN LINEAL ( $\Phi = 90^\circ$ ) .....	14
FIGURA 3-11: COMPONENTES CO-POLAR Y CONTRA-POLAR DEL CAMPO LEJANO BANDA KA POLARIZACIÓN LINEAL ( $\Phi = 90^\circ$ ) .....	14
FIGURA 3-12: COMPONENTES CO-POLAR Y CONTRA-POLAR DEL CAMPO LEJANO BANDA K POLARIZACIÓN LINEAL ( $\Phi = 45^\circ$ ) .....	15
FIGURA 3-13: COMPONENTES CO-POLAR Y CONTRA-POLAR DEL CAMPO LEJANO BANDA KA POLARIZACIÓN LINEAL ( $\Phi = 45^\circ$ ) .....	15

FIGURA 3-14: RELACIÓN AXIAL FILTRO IRIS .....	16
FIGURA 3-15: FILTRO IRIS CON SECCIONES TIPO C .....	16
FIGURA 3-16: PARÁMETRO S11 DEL FILTRO CON SECCIONES TIPO C. ....	17
FIGURA 3-17: RELACIÓN AXIAL FILTRO CON SECCIONES TIPO C.....	17
FIGURA 3-18: S11 ELEMENTO FINAL.....	18
FIGURA 3-19: RELACIÓN AXIAL ELEMENTO FINAL: A) ESCALA DE 0 A 5dB, Y B) ESCALA DE 0 A 40 dB .....	19
FIGURA 3-20: FASE ELEMENTO FINAL .....	19
FIGURA 3-21: CAMPO LEJANO BANDA K POLARIZACIÓN CIRCULAR A DERECHAS DEL ELEMENTO FINAL ( $\Phi = 90^\circ$ ) .....	19
FIGURA 3-22: CAMPO LEJANO BANDA KA POLARIZACIÓN CIRCULAR A DERECHAS DEL ELEMENTO FINAL ( $\Phi = 90^\circ$ ) .....	20
FIGURA 3-23: COMPONENTES CO-POLAR Y CONTRA-POLAR DEL AMPO LEJANO BANDA K POLARIZACIÓN LINEAL DEL ELEMENTO FINAL ( $\Phi = 90^\circ$ ) .....	20
FIGURA 3-24: COMPONENTES CO-POLAR Y CONTRA-POLAR DEL AMPO LEJANO BANDA KA POLARIZACIÓN LINEAL DEL ELEMENTO FINAL ( $\Phi = 90^\circ$ ) .....	20
FIGURA 3-25: COMPONENTES CO-POLAR Y CONTRA-POLAR DEL AMPO LEJANO BANDA K POLARIZACIÓN LINEAL DEL ELEMENTO FINAL ( $\Phi = 45^\circ$ ) .....	21
FIGURA 3-26: COMPONENTES CO-POLAR Y CONTRA-POLAR DEL AMPO LEJANO BANDA KA POLARIZACIÓN LINEAL DEL ELEMENTO FINAL ( $\Phi = 45^\circ$ ) .....	21
FIGURA 4-1: EJEMPLO DE RESPUESTA DEL PARÁMETRO S11 DEL ALIMENTADOR PARA EL ELEMENTO RADIANTE .....	22
FIGURA 4-2: RED DE ALIMENTACIÓN BANDA K: A) ESQUEMÁTICO DE ADS, Y B) LAYOUT.....	23
FIGURA 4-3: S11 RED BANDA K .....	24
FIGURA 4-4: FASE RED BANDA K .....	24
FIGURA 4-5: RELACIÓN DE POTENCIA EN LOS DOS PUERTOS DE LA RED K .....	25
FIGURA 4-6: RED DE ALIMENTACIÓN BANDA KA: A) ESQUEMÁTICO DE ADS, Y B) LAYOUT .....	26
FIGURA 4-7: S11 RED BANDA KA .....	26
FIGURA 4-8: FASE RED BANDA KA .....	27
FIGURA 4-9: RELACIÓN DE POTENCIA EN LOS DOS PUERTOS DE LA RED KA.....	27

FIGURA 4-10: EJEMPLO ESQUEMÁTICO ALIMENTACIÓN CONFIGURACIÓN 1 .....	28
FIGURA 4-10: EJEMPLO ESQUEMÁTICO ALIMENTACIÓN CONFIGURACIÓN 2.....	28
FIGURA 4-11: PROTOTIPO DE ALIMENTACIÓN PARA UN ARRAY PLANAR.....	29
FIGURA 4-12: PROTOTIPO DE ALIMENTACIÓN PARA UN ARRAY LINEAL .....	29
FIGURA 0-1: ESTRUCTURA GUÍA DE ONDA CIRCULAR [13].....	I

## INDICE DE TABLAS

TABLA 1 : ESPECIFICACIONES DEL ELEMENTO RADIANTE. ....	9
TABLA 2 : FRECUENCIAS DE CORTE DE LA CAVIDAD. ....	10
TABLA 3 : DESCRIPCIÓN ELEMENTOS DISEÑO DEL ELEMENTO UNITARIO INICIAL. ....	12
TABLA 4 : DIRECTIVIDADES Y ANCHOS DE HAZ DEL ELEMENTO UNITARIO INICIAL. ....	16
TABLA 5 : COMPARACIÓN ANCHO DE BANDA FILTRO DE ANILLOS Y SECCIONES C. ....	17
TABLA 6 : COMPARACIÓN ANCHO DE BANDA FILTRO DE ANILLOS, SECCIONES POLARIZADOR EN APERTURA.....	18
TABLA 7 : DIRECTIVIDAD Y ANCHO DE HAZ PARA EL ELEMENTO FINAL.....	21
TABLA 8 : VALORES DE $pmn'$ PARA MODOS TE EN GUÍA CIRCULAR. ....	I
TABLA 9 : VALORES DE $pmn'$ PARA MODOS TM EN GUÍA CIRCULAR. ....	II

# 1 Introducción

---

## 1.1 Motivación

La motivación del diseño del elemento radiante y de su red de alimentación en este Trabajo Fin de Grado (TFG) se produce por la necesidad de mejorar los sistemas de comunicaciones por satélite actuales y cumplir con los requisitos actuales, especialmente los requisitos de apuntamiento fino, bajo perfil y bajo peso, estos son unos requisitos muy importantes para poder lograr que las aplicaciones SATCOM móviles logren tener un posicionamiento en el mercado competitivo en diferentes escenarios al de su uso tradicional. Lo anterior, más aún, cuando se trata de sistemas que trabajan en las bandas K y Ka, con un porcentaje de ancho de banda mayor al 30%,

La tecnología de phased array antennas (antenas orientadas electrónicamente), parece dar con la solución al requisito de bajo perfil para sistemas de comunicaciones en movimiento y bajo perfil. En el presente TFG, se plantea como caso de estudio un panel plano de bajo perfil con capacidad de escaneo cónico en un rango menor al ancho de haz del elemento radiante unitario.

## 1.2 Objetivos

Se propone un sistema de array de antenas pasivo, que permita su ampliación futura de forma modular en sistemas de mayor apertura y más complejos. Para ello, se plantea como objetivo principal obtener un elemento unitario con doble banda y polarización circular, todo ello con una única apertura, su uso puede ser el de elemento unitario de un sistema de array de antenas, de un sistema de array de antena adaptativo o como alimentador compacto para un sistema de antenas reflectoras. En este sentido, debe obtener el diseño su red de alimentación y propuesta para la red pasiva de un sub-array o demostrado escalable.

Para conseguir el objetivo principal, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Revisión de la teoría relacionada al problema bajo estudio y del estado del arte,
- Definición de propuesta de diseño y análisis de sus componentes, cavidad, filtro, carga dieléctrica y polarizador de apertura, red de alimentación,
- Propuesta de red de alimentación a nivel de elemento radiante, y propuesta para sub-array modular.
- Discusión de los resultados obtenidos.

Además, se hará el estudio de alimentación de dicho elemento, con diferentes configuraciones posibles.

### **1.3 Organización de la memoria**

La memoria consta de los siguientes capítulos:

1. En el primer capítulo se realiza una breve introducción en la que se explica la motivación y los objetivos de este trabajo.
2. En el segundo capítulo se presenta el estado del arte actual, en el que se analizan las tendencias de diseño y un marco teórico en el que se explican algunos conceptos básicos que se tratarán a lo largo del documento.
3. El capítulo tercero se centra en el desarrollo y estudio de un elemento concreto, utilizando una cavidad circular y elementos de filtrado y polarización.
4. En el cuarto capítulo se estudia la manera de alimentar el elemento obtenido en el capítulo tres, así como dos redes de alimentación y diferentes configuraciones posibles empleando dichas redes. Por otro lado, se propone la red de alimentación conceptual para un sub-array o demostrador modular.
5. El quinto capítulo recoge las conclusiones obtenidas del trabajo realizado.
6. En el sexto capítulo se plantean posibles trabajos futuros que mejoren los diseños ya realizados, o completen algunos aspectos que no han podido ser terminados.

## 2 Estado del arte

---

En este segundo capítulo del TFG vamos a presentar una descripción del enfoque e implementación que se están llevando a cabo en los desarrollos actuales de la tecnología que deseamos diseñar, además de explicar los conceptos teóricos sobre los que nos apoyaremos a lo largo del trabajo.

### 2.1 Tendencias actuales

Como hemos comentado en el primer apartado de este TFG, la tecnología de phased array parece ser una buena solución del problema planteado, pero también es cierto que esta tecnología es hasta el momento de unos precios verdaderamente altos y su mercado está enfocado al uso militar, por este motivo al menos dos empresas, Phasor Inc y Kymeta Corp., están trabajando en poder acercar esta tecnología de antenas de bajo perfil al mercado.

Phasor está en las fases finales para llevar al mercado las antenas de banda en fase Ku, por su parte Kymeta se ha centrado tanto en la banda Ku como Ka mediante el uso de meta-materiales, tecnología aún en desarrollo que no ha sido probada comercialmente. Estos diseños proponen un array de antena para cada banda de trabajo, aún no proponen una solución de doble banda y doble polarización que permita reducir volumen, peso y coste de los sistemas de comunicaciones por satélite.

#### 2.1.1 Elementos radiantes

En los artículos estudiados con el fin de poder tomar ideas, nos hemos encontrado con que hay una tendencia marcada en cuanto a la obtención del elemento radiante, esta es realizando un array de antenas de doble banda con diferentes elementos que comparten la misma apertura de la antena, en cuanto a la alimentación de los sistemas hay una mayor variabilidad.

En [1] se propone el diseño de un array funcional tanto para Tx como para Rx en las bandas K y Ka, para obtener este elemento de doble banda han hecho un elemento en el que se intercalan el elemento de transmisión con el de recepción en una apertura, con esto han logrado reducir el tamaño y el número de elementos radiantes.

Los autores de [2] realizan un array de antenas para radares de apertura sintética de doble banda y doble polarización, en este diseño se vuelve a repetir la operación de unir dos elementos que trabajan en bandas diferentes pero que comparten apertura, en este caso las bandas son las C y X, también en [3] se sigue la idea de crear un array en este caso de dipolos en forma de C, que son alimentados con un puerto coaxial a cada par de dipolos.

Los autores de [1] han diseñado un elemento compacto de polarización circular con doble banda que comprende un divisor de potencia pasivo en tecnología microstrip, en el caso de [4] se ha propuesto un elemento radiante de doble banda para radar de apertura sintética, la alimentación que se propone es a través de una ranura cuadrada que excita una ranura en forma de anillo, esta es una idea de alimentación que nos será útil en nuestro trabajo, en [5] se presenta un parche doble apilado con bandas de trabajo K y Ka, en esta propuesta se alimenta el parche mediante una ranura en forma de cruz, que limita la alimentación secuencial a solo cuatro puntos.



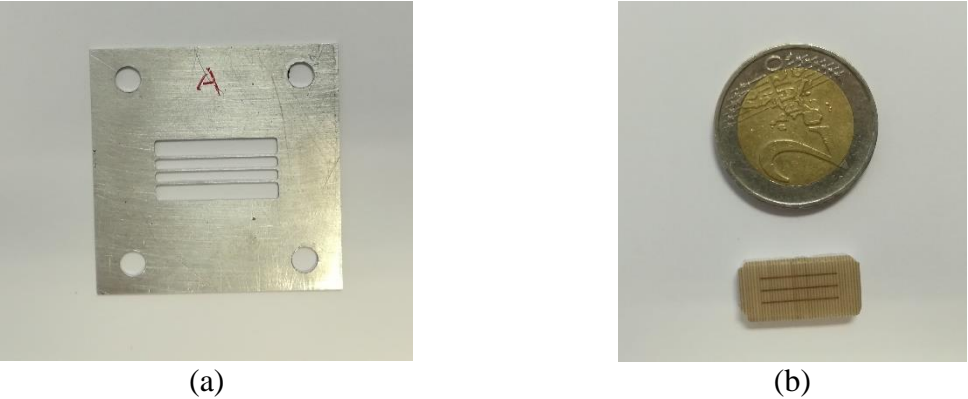
Por tanto, queda clara que la línea del diseño está enfocándose a realizar un array de elementos, que para el caso de querer tener dos bandas de trabajo se intercalan elementos compartiendo la misma apertura.

## 2.2 Marco teórico

En esta sección del trabajo desarrollaremos los conceptos básicos teóricos sobre los cuales nos hemos apoyado para la realización del diseño de nuestro elemento.

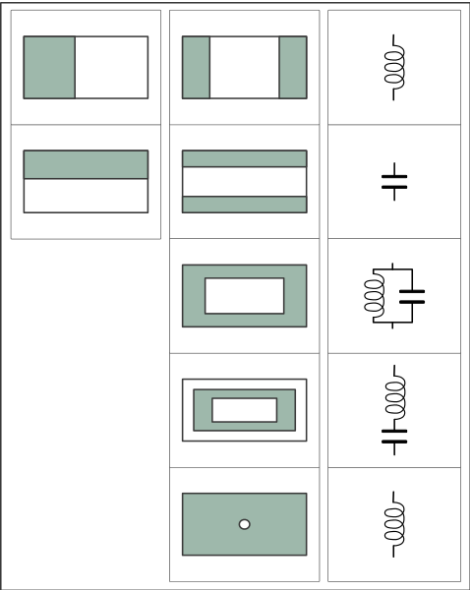
### 2.2.1 Filtros Iris

Un filtro de tipo iris es un filtro de cavidad resonante, que puede estar formado por una plancha de metal con una serie de ranuras o por saltos en las dimensiones de la geometría de la cavidad, dependiendo el tipo de geometría física, el filtro tiene unas características, u otras, por ejemplo, una geometría simple que podemos encontrar en muchos componentes pasivos es un filtro iris rectangular, son muy empleados en multiplexores para acoplar cavidades resonantes, o en polarizadores de guía de onda como desfaseador [6].



**Figura 2-1: Filtros IRIS [7], a) en aluminio por micro laser o mecanizado, y b) multicapa por tecnología de circuitos impresos**

En la siguiente imagen veremos algunos tipos de estructura de filtros Iris con su correspondiente circuito equivalente.



**Figura 2-2: Geometría iris**

El tipo de Geometría que buscamos implementar es la que tiene como circuito de tipo LC serie equivalente, ya que según lo visto en la asignatura de electrónica de comunicaciones [8] estos circuitos se comportan de manera equivalente a un filtro de tipo paso banda, que encaja con la idea concebida de tener doble banda de trabajo.

### 2.2.2 Stub

En radiofrecuencia, un Stub, o sintonizador, es un segmento de línea de transmisión o guía de onda, que está conectado sólo a un extremo. Estos sintonizadores nos permiten adaptar cualquier impedancia de carga, los parámetros a ajustar son, la longitud del segmento y el valor de reactancia o susceptancia del sintonizador, algunas de las configuraciones más empleadas son el tipo serie y paralelo [9]:

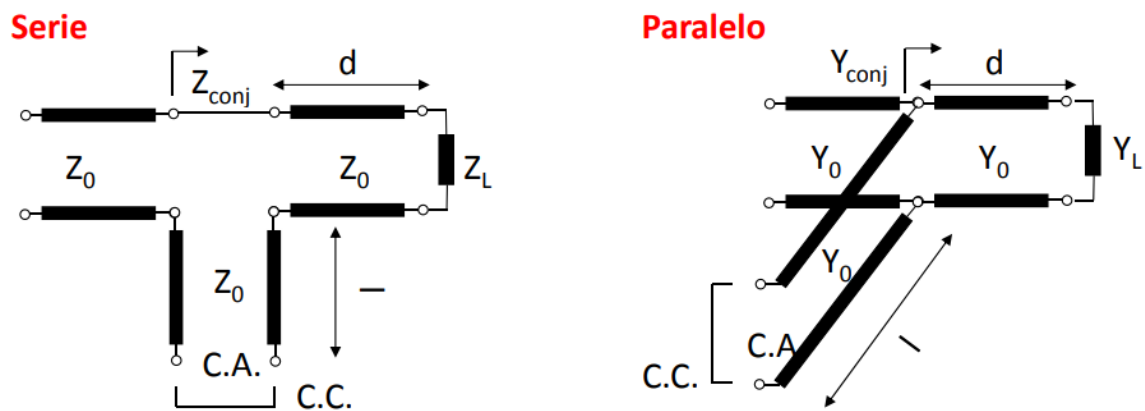


Figura 2-3: Circuitos serie y paralelo Stub [9]

### 2.2.3 Guía de onda

Una guía de onda es cualquier estructura física que sirve como medio guiado para una onda electromagnética, si en una línea de transmisión se transmite un voltaje y una corriente de alta frecuencia, en una guía de onda la señal que se transmite es directamente un campo electromagnético, las guías de onda tienen multitud de aplicaciones como pueden ser filtros, circuladores o acopladores.

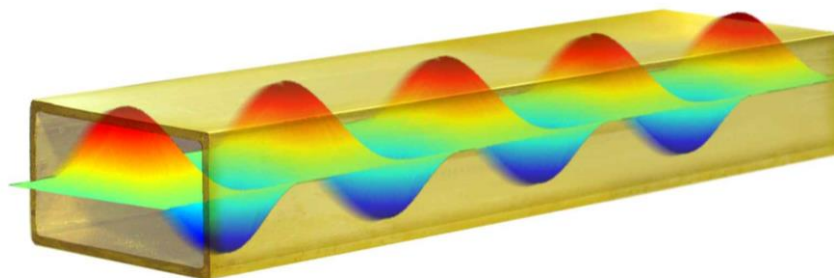


Figura 2-4: Modo TE<sub>10</sub> en guía rectangular

### 2.2.4 Resonador

Llamamos resonador electromagnético a los dispositivos formados por superficies dieléctricas y estructuras metálicas, que emplean dicha resonancia para seleccionar el conjunto de frecuencias deseadas.

### 2.2.5 Parámetros S

Conocemos como parámetros S a los distintos valores que conforman a la matriz de dispersión o scattering, igual que existen matrices para medir las relaciones entre las distintas tensiones o corrientes, tenemos la matriz de scattering, que relaciona las amplitudes de las ondas de potencia entrantes y salientes del circuito [10].

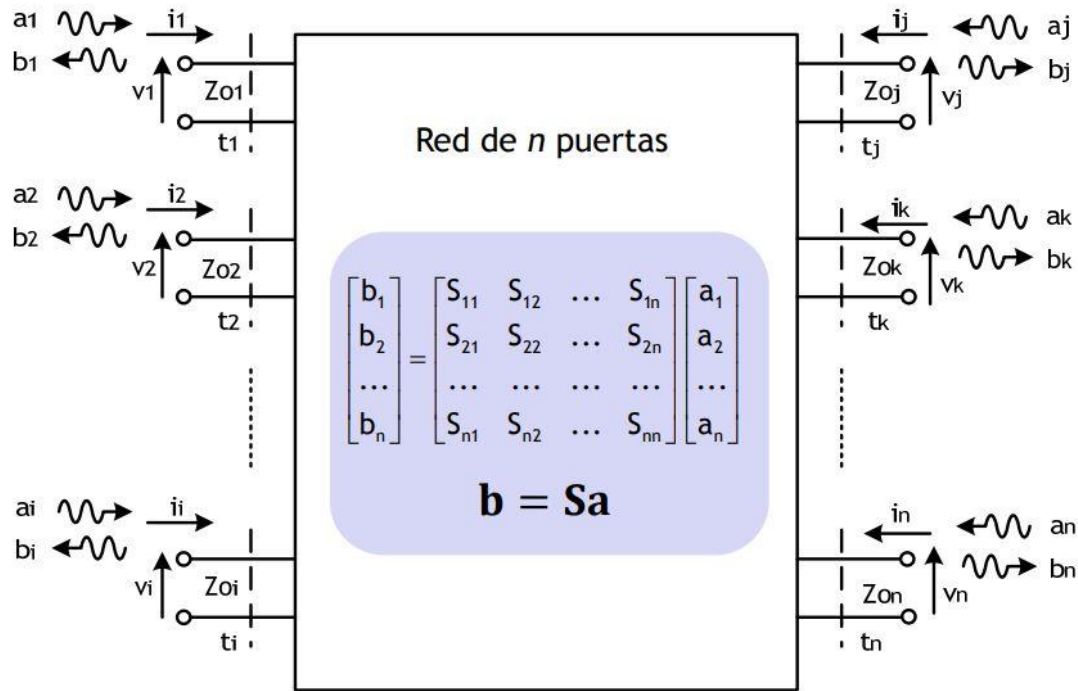


Figura 2-5: Matriz S [10]

La manera de obtener los distintos valores de los parámetros S es la siguiente [10]:

$$S_{ji} = \left. \frac{b_j}{a_i} \right|_{a_k=0 \text{ } k \neq i} \quad (1)$$

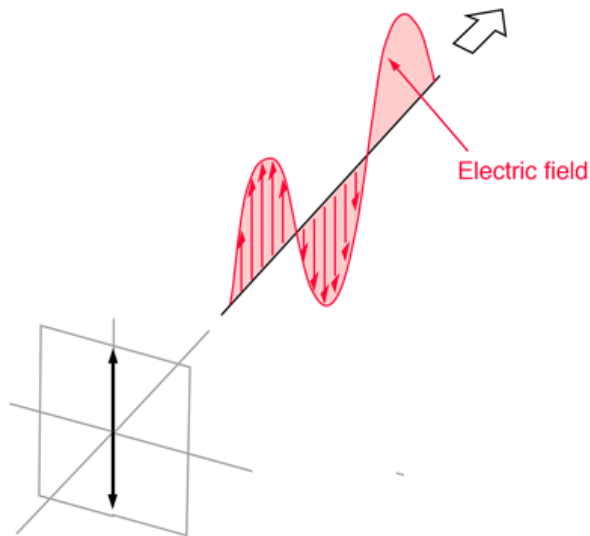
Como podemos intuir a partir de la imagen y la fórmula uno de los parámetros más interesante a estudiar es el parámetro  $S_{ii}$ , a este parámetro recibe el nombre de coeficiente de reflexión, cuyo significado físico nos indica la cantidad de potencia que se refleja en la puerta i, cuando se entrega potencia por la puerta i.

### 2.2.6 Polarización

La polarización de una antena es la figura que traza en función del tiempo, para una dirección fija, el extremo del vector del campo radiado y su sentido de giro, visto por un observador desde la antena [11].

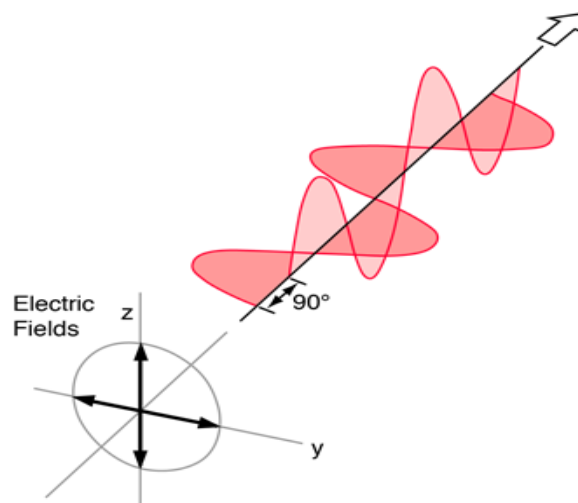
Se pueden encontrar tres tipos de polarización: lineal, circular y elíptica.

- **Polarización lineal:** El campo proyectado sobre el plano del observador lo hace sobre una recta. [11].



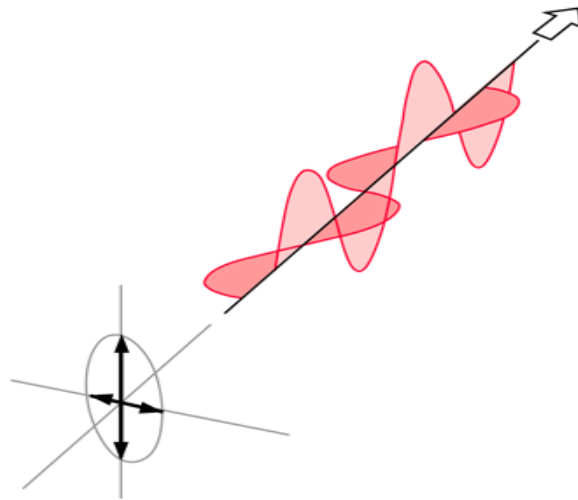
**Figura 2-6: Polarización lineal [11]**

- **Polarización circular:** El extremo del campo proyectado sobre el plano del observador se mueve sobre una circunferencia, esto se logra desfasando los dos vectores del campo radiado  $\pm 90^\circ$  [11].



**Figura 2-7: Polarización circular [11]**

- **Polarización elíptica:** El extremo del campo proyectado sobre el plano del observador se mueve sobre una elipse [11].



**Figura 2-8: Polarización elíptica [11]**

### **2.2.7 Relación axial**

Un parámetro que es de gran importancia cuando hablamos de polarizaciones circulares o lineales es el de la relación axial, este valor nos proporciona la relación de amplitudes del vector de campo radiado, en una polarización circular perfecta es 1 (0dB) y en una polarización lineal es  $\infty$ .

### 3 Diseño elemento radiante

Después de haber analizado los conceptos fundamentales y el estado del arte, vamos a pasar a la fase de diseño del elemento radiante que planteamos. Como hemos mencionado anteriormente, buscamos que tenga una buena respuesta tanto en la banda K, como Ka, además de que el elemento sea lo más compacto posible, ya que si no tuviéramos como factor limitante las dimensiones podríamos optar por el uso de un reflector o sistemas de doble apertura, y este no es uno de los objetivos.

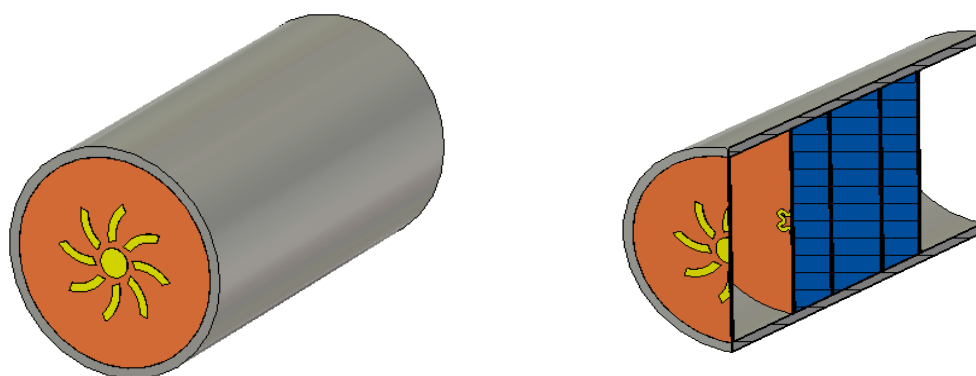
Tabla especificaciones para el elemento radiante:

**Tabla 1 : Especificaciones del elemento radiante.**

Frecuencia RX [GHz]	17.5-21.2
Frecuencia TX [GHz]	27.5-31
Ancho de banda [GHz]	1
S11 [dB]	$\leq -15$
Directividad del elemento radiante [dBi]	6
Ancho de haz [°]	$>60$
Relación axial [dB]	$\leq 2$ para todo el rango de exploración
Longitud [mm]	$\leq 25$

El elemento radiante bajo estudio consiste en 2 secciones fundamentales. Estas secciones son:

- **Sintonizador en la apertura:** Con la sección del sintonizador conseguimos tener la banda de trabajo en el rango de frecuencias superior y una buena relación axial.
- **Filtro tipo iris tipo anillos resonantes:** Esta sección del elemento consiste en el uso de 4 anillos resonadores situados sobre un sustrato de tipo cerámico (dupont) y separados entre sí por una capa de FOAM.



**Figura 3-1: Diseño elemento radiante**

El orden de presentación de las secciones del elemento va a ir en función del orden en el cual se han ido desarrollando.

Para la realización del diseño se han empleado las herramientas CST y ADS, utilizando en esta última la herramienta LineCalc que incluye dentro del programa, la cual nos permite obtener las dimensiones de cualquier línea de transmisión.

### 3.1 Definición de la cavidad

Para el diseño de la cavidad del elemento nos planteamos dos posibles variantes, la primera de ellas una cavidad en guía rectangular, o en guía circular, finalmente nos decantamos por una cavidad circular (Figura 3-2) por dos motivos principalmente, el primero de ellos es, que en una guía circular se puede tener un mayor control sobre la polarización deseada debido a las tecnología de fabricación, y el segundo es que el fin de este trabajo es poder alcanzar un modelo fabricable del elemento, y este modelo resulta más sencillo de fabricar si la forma de la guía es circular, en resumen los dos motivos por los cuales se elige esta geometría es el control de la geometría y la sencillez de su fabricación.

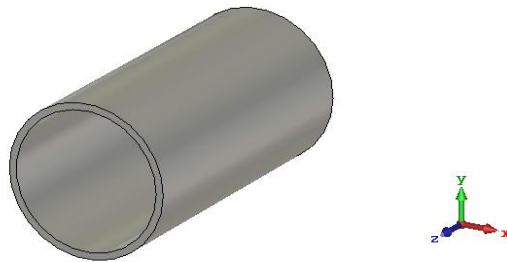


Figura 3-2: Guía de onda circular del diseño

A continuación, presentamos un estudio con los modos que se propagan en la guía, cuyo radio interior es de 5mm. En la tabla vemos que en total se propagan 3 modos en nuestra guía en el rango de frecuencia deseado.

Tabla 2 : Frecuencias de corte de la cavidad.

Modo	Frecuencia de Corte [GHz]
$TE_{11}$	17.58
$TM_{01}$	22.96
$TE_{21}$	29.16

Como vemos en las siguientes figuras, los cálculos analíticos previos a la simulación eran correctos. En la Figura 3-5 de la propagación del modo  $TE_{21}$  aparece que el modo no se propaga completamente, esto se debe a que el programa de simulación está tomando como frecuencia de trabajo 25GHz, pero en la banda de trabajo de transmisión si que llega a propagarse este modo debido a que nuestra frecuencia máxima es de 31GHz.

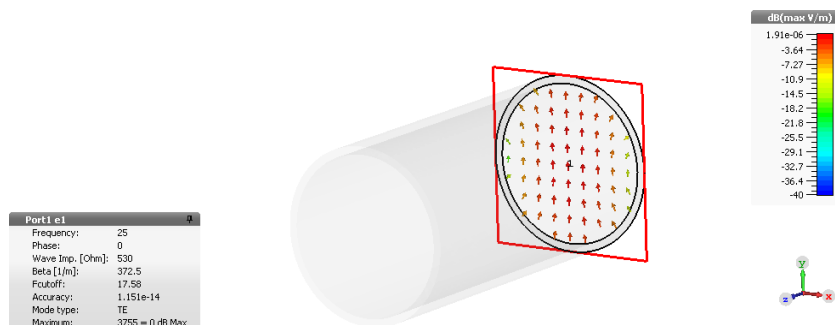
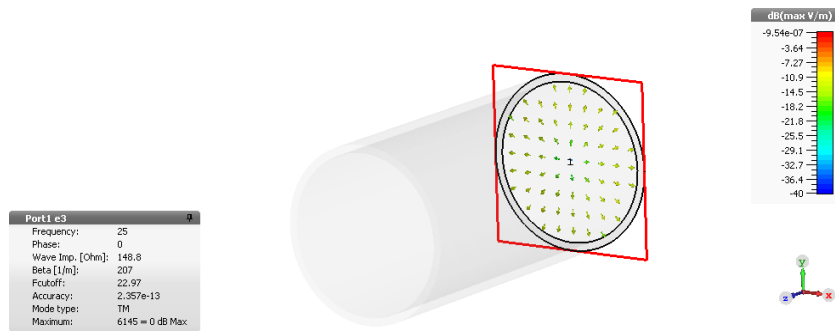
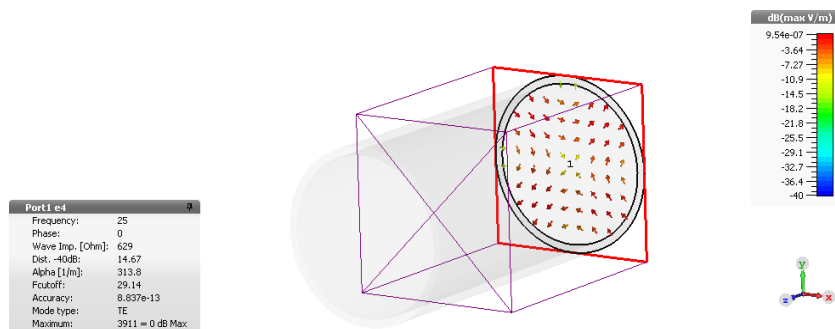


Figura 3-3: Propagación Modo TE11



**Figura 3-4: Propagación modo TM01**

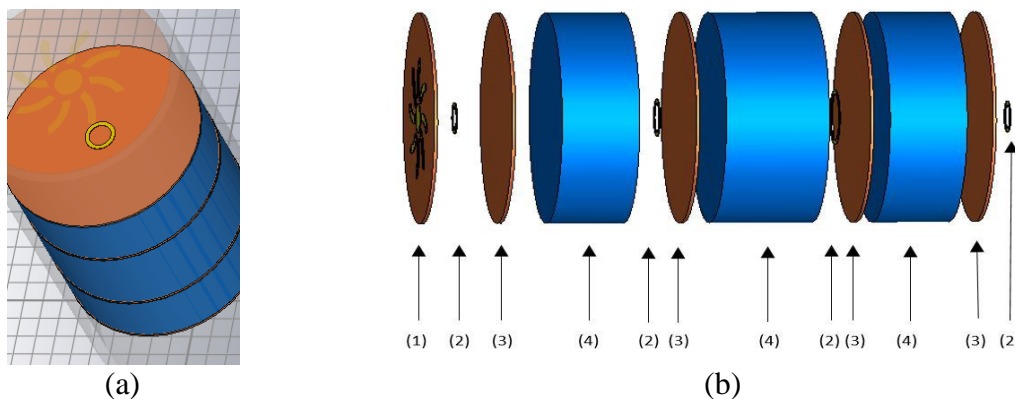


**Figura 3-5: Propagación Modo TE21**

### 3.2 Filtro de Irises en cavidad

El filtro en cavidad empleado consta de 4 resonadores formados por secciones tipo C, que nos permitirán alcanzar una adaptación en la banda K, en el rango de frecuencias detallado, según el criterio de obtener una adaptación de parámetro  $S_{11} < -10\text{dB}$ .

La fase de diseño ha tenido varias etapas, en una primera fase del diseño hemos creado el filtro a partir de una estructura de tipo IRIS, con anillos simples de cobre. Como podemos ver a continuación, el filtro en la primera fase ha tenido el siguiente aspecto:



**Figura 3-6: Esquema del elemento radiante con filtros de irises en cavidad. a) Corte del elemento radiante, y b) Imagen de explosión isométrica del elemento radiante**

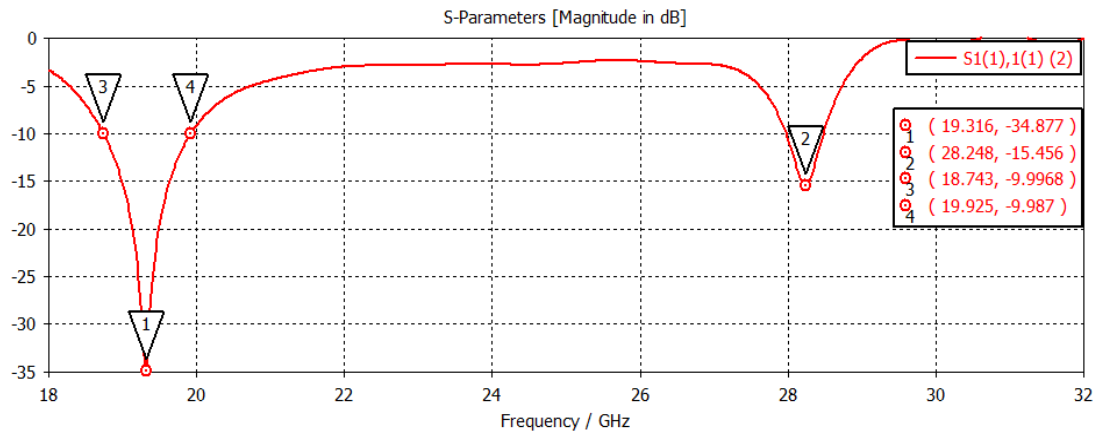


**Tabla 3 : Descripción elementos diseño del elemento unitario inicial.**

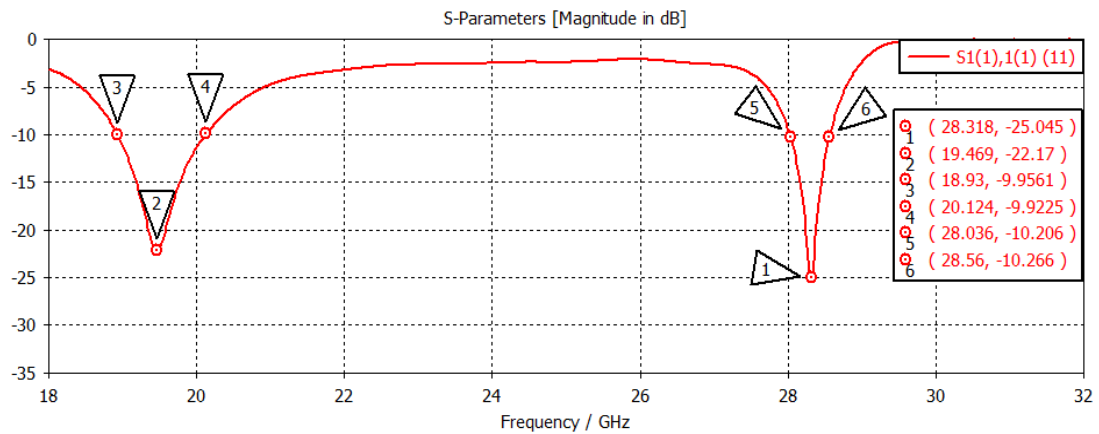
Sección	Descripción
(1)	Parche de dipolos en apertura del elemento.
(2)	Anillo circular de cobre.
(3)	Sustrato dieléctrico de tipo cerámico (DuPont).
(4)	Material aislante de tipo FOAM.

Tanto las dimensiones de los anillos, como las del material FOAM y su posición han sido variables de diseño y se han ido ajustando en favor de alcanzar el objetivo de adaptación.

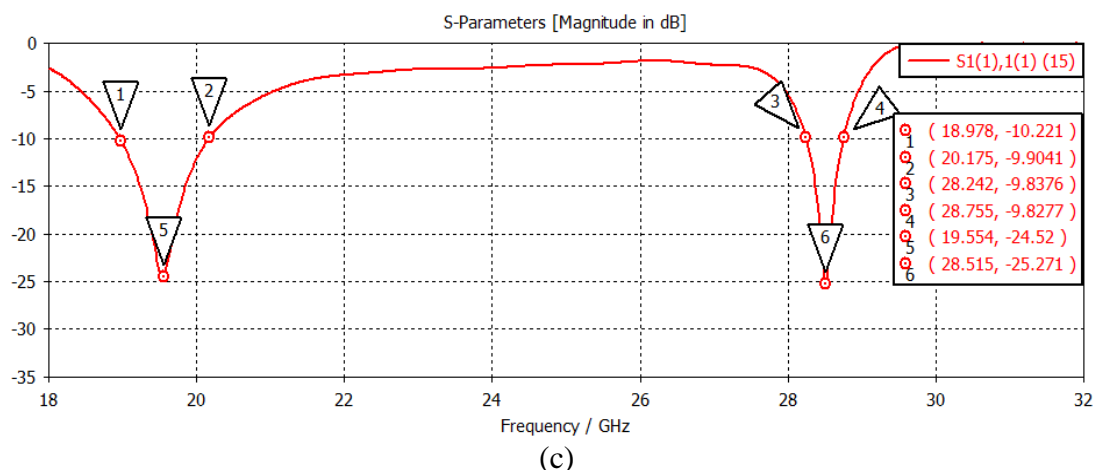
Los mejores resultados que se han obtenido en esta fase han sido:



(a)



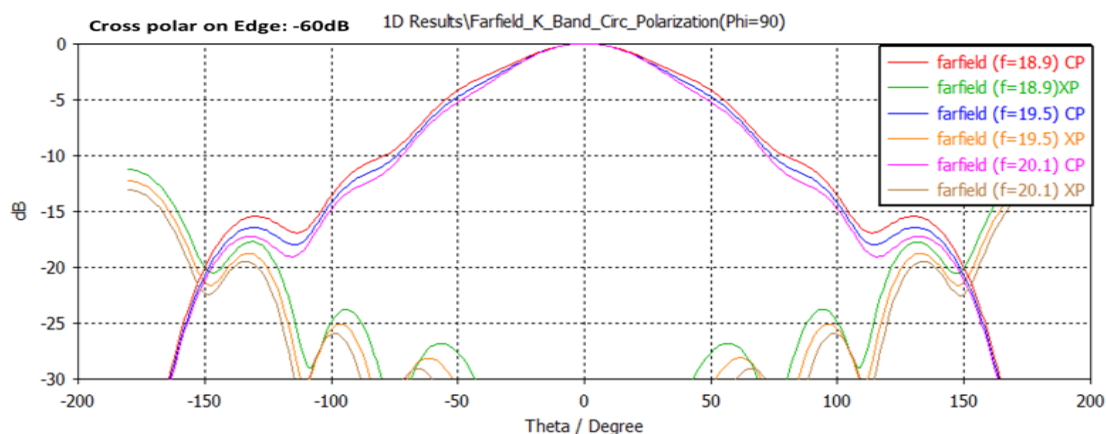
(b)



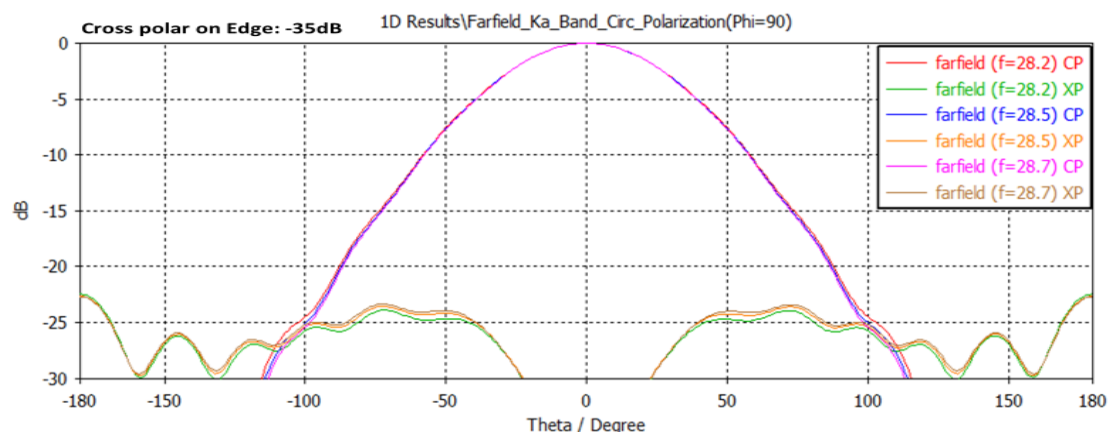
**Figura 3-7: Adaptaciones diseño I: a) Radio 0.9 mm, b) Radio 0.8 mm, y c) Radio 0.7 mm**

Como se puede observar, se obtienen dos bandas en las que se produce una adaptación que cumple con la especificación de adaptación, pero no así con el ancho de banda, ya que en la banda Ka apenas se obtienen 500MHz, cuando el objetivo planteado considera obtener un ancho de banda de hasta 1GHz en cada una. Por otro lado, aún es muy resonante su respuesta, por lo que se propone para trabajos futuros trabajar con la etapa de filtrado del elemento para obtener aún mejores prestaciones.

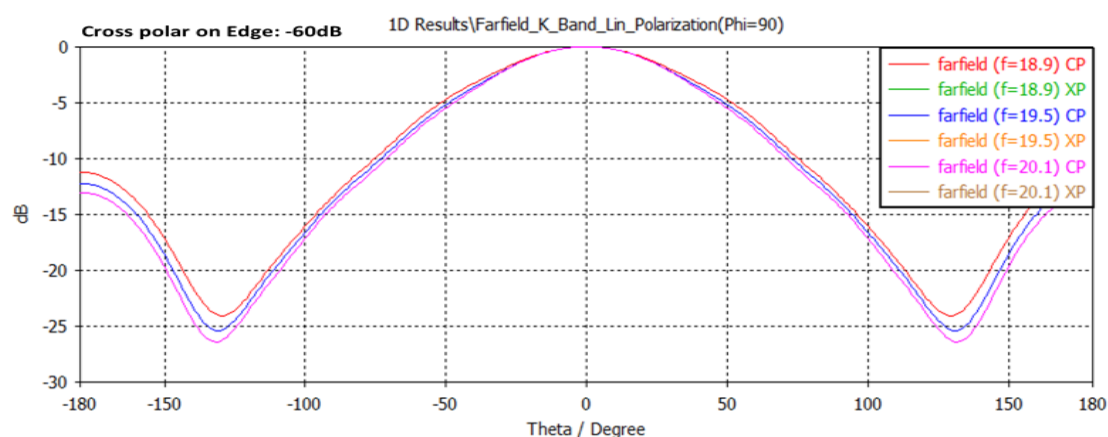
Pese a que los resultados no presentan el mayor ancho de banda deseado, pero sí válido para sistemas de SATCOM que requieren 500MHz de ancho de banda, se han obtenido los diagramas de campo lejano tanto para polarización circular y lineal del elemento, así como su respuesta en relación axial.



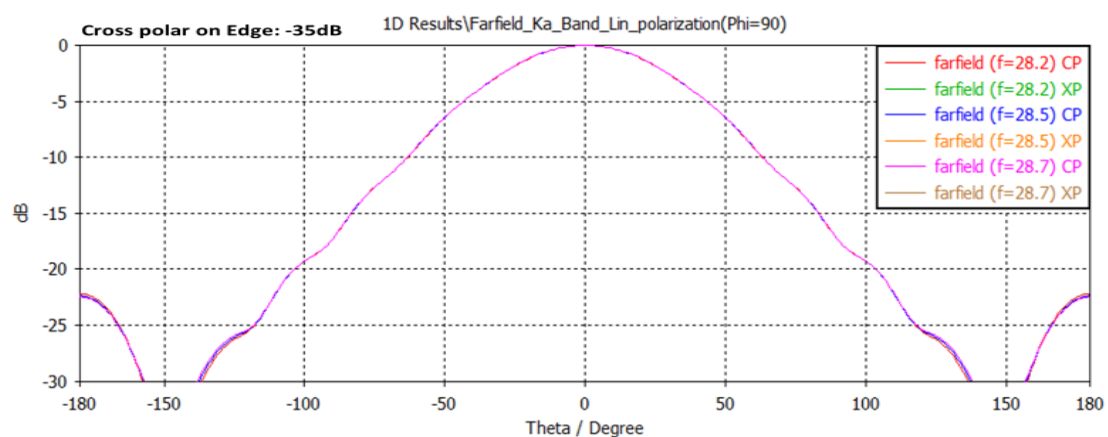
**Figura 3-8: Campo lejano Banda K polarización circular a derechas (Phi = 90°)**



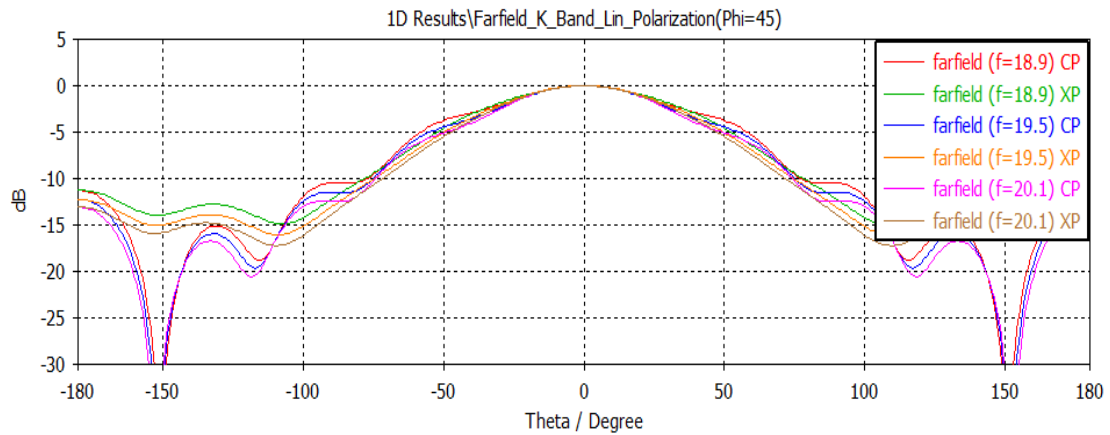
**Figura 3-9: Campo lejano Banda KA polarización circular a derechas ( $\Phi = 90^\circ$ )**



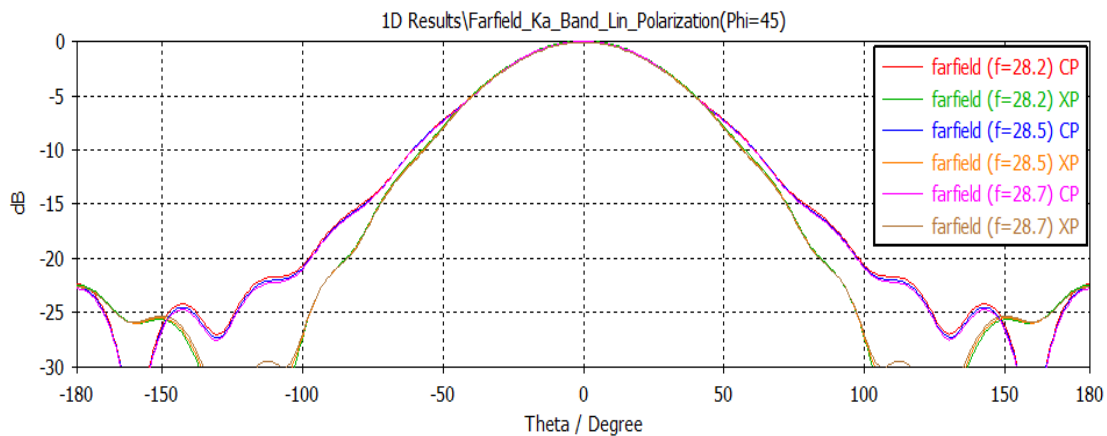
**Figura 3-10: Componentes Co-polar y Contra-polar del campo lejano Banda K polarización lineal ( $\Phi = 90^\circ$ )**



**Figura 3-11: Componentes Co-polar y Contra-polar del campo lejano Banda Ka polarización lineal ( $\Phi = 90^\circ$ )**



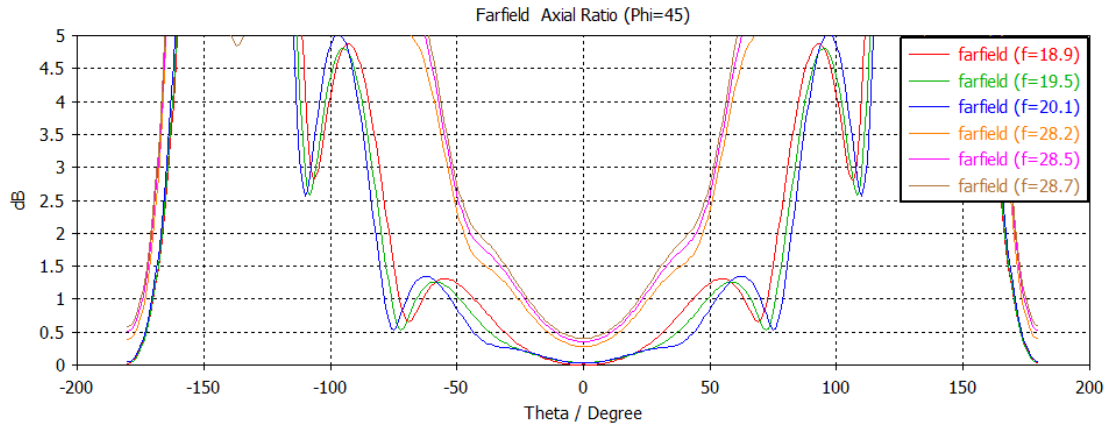
**Figura 3-12: Componentes Co-polar y Contra-polar del campo lejano Banda K polarización lineal ( $\Phi = 45^\circ$ )**



**Figura 3-13: Componentes Co-polar y Contra-polar del campo lejano Banda Ka polarización lineal ( $\Phi = 45^\circ$ )**

En las representaciones con polarización lineal para el corte  $\Phi = 90^\circ$  también se han representado las componentes contrapolares, pero dado que el límite visible se ha fijado en -30 dB no aparecen ya que no tienen efecto apreciable. Sin embargo, para el corte de  $\Phi = 45^\circ$ , la componente contrapolar si es apreciable.

Como podemos ver en la Figura 3-14 sobre la relación axial que presenta el elemento, vemos como al pasar de  $50^\circ$  en la banda de frecuencias correspondiente a la banda Ka, la relación axial empeora incrementando de manera exponencial, y este mismo efecto se produce en la banda K cuando se sobrepasan alrededor de los  $70^\circ$ , por tanto, buscaremos alguna mejora que se pueda aplicar sobre la apertura del elemento para poder mejorar esta relación axial, bien para el elementos objeto de estudio o para elementos menos directivos que permitan un rango mayor para el escaneo de haz. Como se comentó anteriormente, también se buscarán mejoras sobre los elementos que conforman el filtro para aumentar el ancho de banda.



**Figura 3-14: Relación axial filtro Iris**

Los valores obtenidos de directividad y ancho de haz a -3dB, son los siguientes:

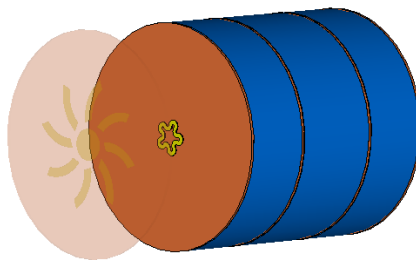
**Tabla 4 : Directividades y anchos de haz del elemento unitario inicial.**

Frecuencia[GHz]	Directividad[dBi]	$\Delta\theta_{-3dB}[^\circ]$
18.9	7.4	81.2
19.5	7.8	72.1
20.1	8.2	68.2
28.2	9.8	60.3
28.5	9.9	59.9
28.7	9.9	59.8

Debido al poco ancho de banda que se obtiene en la banda Ka y que su relación axial es mejorable en comparación a la obtenida en banda K, hemos optado por modificar el filtro para intentar mejorar ambos parámetros, estudiando el artículo [12] vemos como el optar por elementos resonantes puede provocar mejora en el parámetro de adaptación.

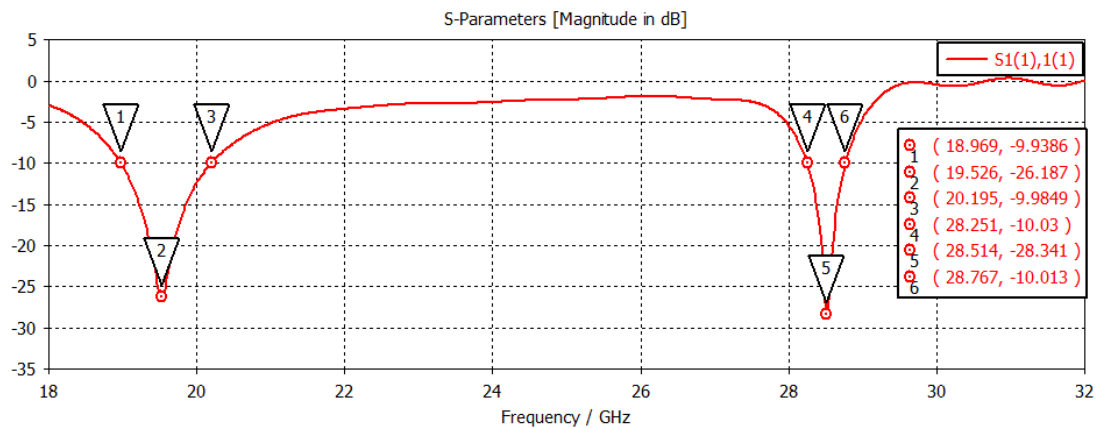
### 3.2.1 Filtro Iris con secciones tipo C

La primera mejora que se ha planteado sobre el diseño ha sido modificar los elementos del filtro, sustituyendo los anillos, por secciones de tipo C curvos circularmente, la ubicación y tamaño de las mismas viene impuesto por los anillos iniciales del filtro, basándonos en el elemento multi-frecuencia propuesto en [12] para FSS (Frequency Selective Surface).

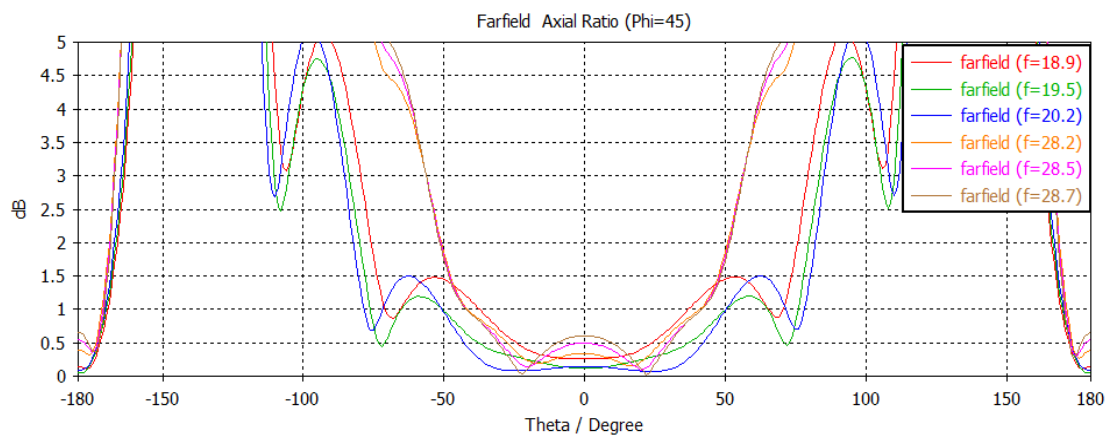


**Figura 3-15: Filtro Iris con secciones tipo C**

Los parámetros de interés de este nuevo diseño son el parámetro S11 para ver si hemos obtenido alguna mejora en cuanto a la adaptación y el parámetro de relación axial.



**Figura 3-16: Parámetro S11 del filtro con secciones tipo C.**



**Figura 3-17: Relación Axial filtro con secciones tipo C.**

**Tabla 5 : Comparación ancho de banda Filtro de anillos y secciones C.**

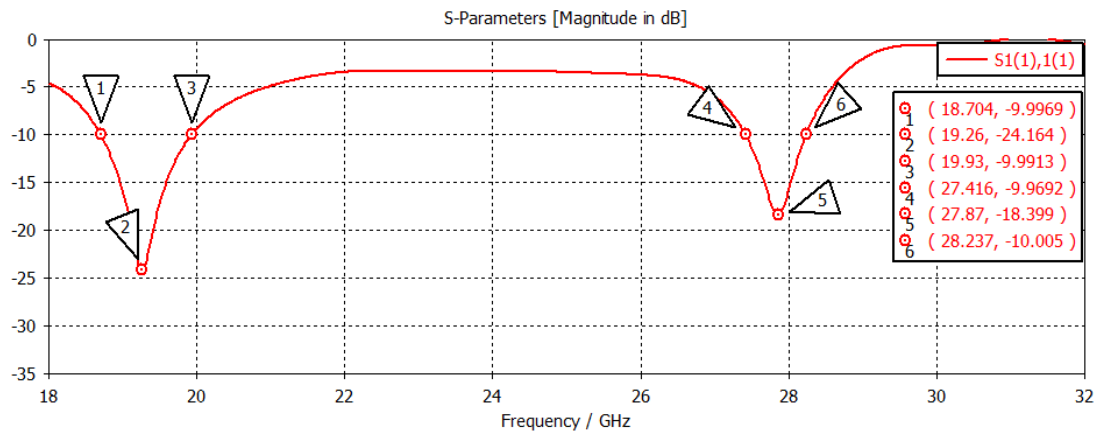
Tipo de filtro	Ancho de banda en K	Ancho de banda en Ka
Anillos	1.2GHz	510MHz
Secciones tipo C	1.2GHz	510MHz

En cuanto al ancho de banda, la opción de utilizar en el filtro secciones de tipo C no produce una mejora notable, pero si vemos mejora en la relación axial en banda Ka, pasando de tener un ángulo de 30° para 1.5dB, a tener aproximadamente 50° para este mismo valor, con lo que la mejora es válida.

### 3.3 Elemento Final

El elemento unitario al que se ha llegado finalmente consta de dos variaciones añadidas respecto al elemento con el filtro de secciones tipo C, estas dos variaciones ha sido la inserción de una carga dieléctrica de tipo cono corrugado en la apertura de la cavidad, y la sustitución del polarizador inicial, por un polarizador ajustable en frecuencia con stubs.

Los resultados que se obtienen introduciendo dichas modificaciones son los siguientes:



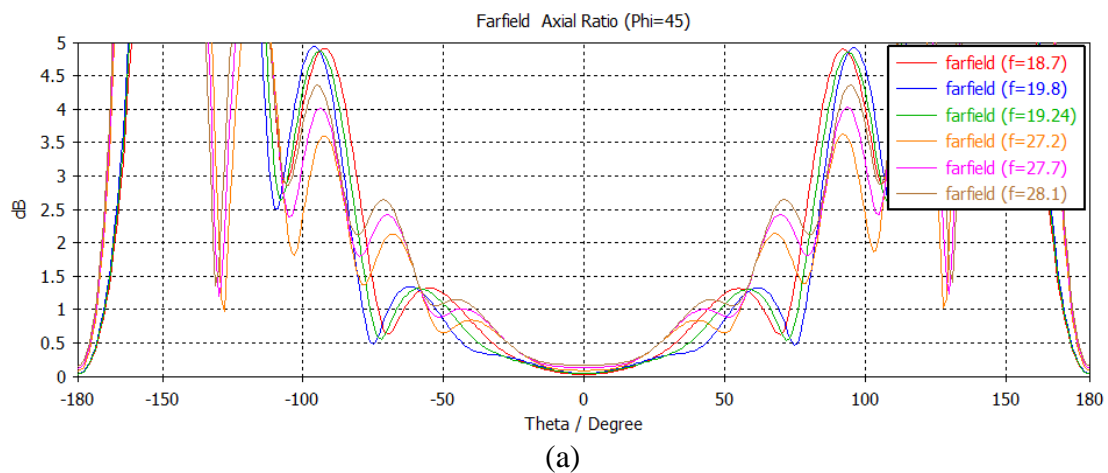
**Figura 3-18: S11 Elemento final**

Como se puede observar, el nivel de adaptación empeora, aunque poco, sobre todo en la banda Ka, ya que se desplaza el valor de resonancia de 28.5GHz y -28.3dB, hasta el valor actual de 27,8 y una adaptación de -18,4dB, sin embargo, el ancho de banda bajo el criterio de  $S_{11} \leq -10\text{dB}$  aumenta, pasando de 516MHz a 820MHz. Por otro lado, en la banda K, el único efecto que se ha producido ha sido un desplazamiento en frecuencia, pero la adaptación es prácticamente idéntica.

**Tabla 6 : Comparación ancho de banda Filtro de anillos, secciones Polarizador en apertura**

Tipo de filtro	Ancho de Banda [MHz]	
	K	Ka
Anillos	1200	510
Secciones tipo C	1200	510
Polarizador en apertura	1200	821

Como podemos observar en la Figura 3-19, la relación axial que se obtiene con la variación añadida es bastante significativa, obteniendo alrededor de  $70^\circ$  en la banda K, y unos  $55^\circ$  en banda Ka, para obtener un valor de 1.5dB. A continuación, mostramos la relación axial obtenida con dicho elemento.



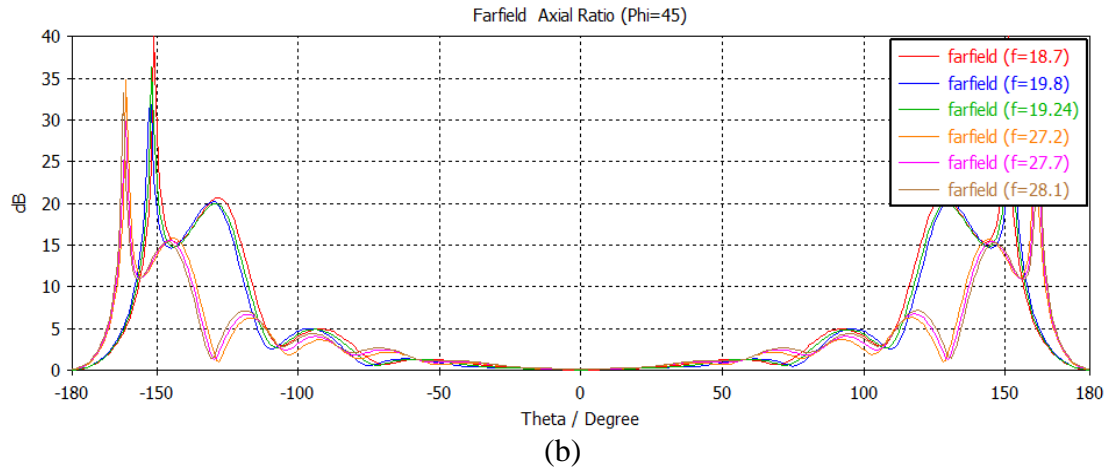


Figura 3-19: Relación axial Elemento final: a) Escala de 0 a 5dB, y b) Escala de 0 a 40 dB

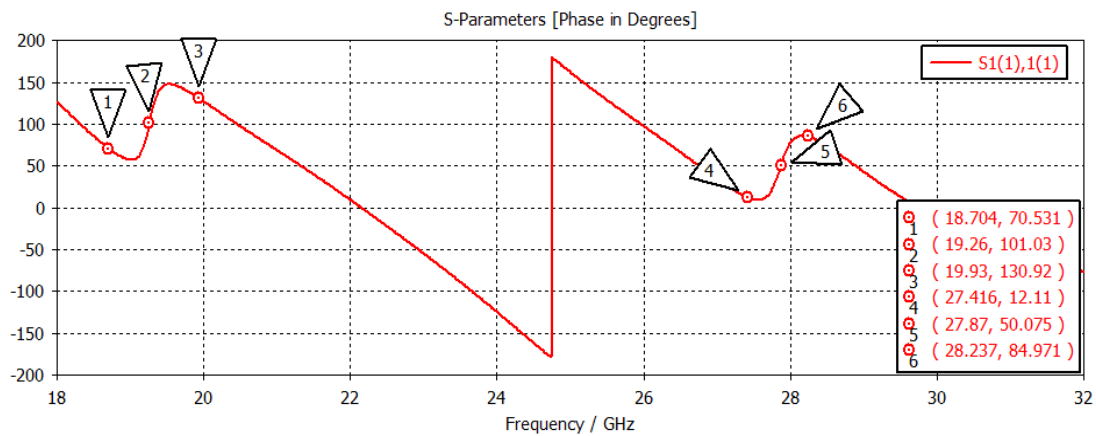


Figura 3-20: Fase Elemento final

En este sentido, la mejora final introducida es lo suficientemente buena como para permitirnos comprometer el nivel de adaptación en favor de la mejora en relación axial. A continuación, mostramos los resultados de campos lejanos y directividad que se han obtenido finalmente.

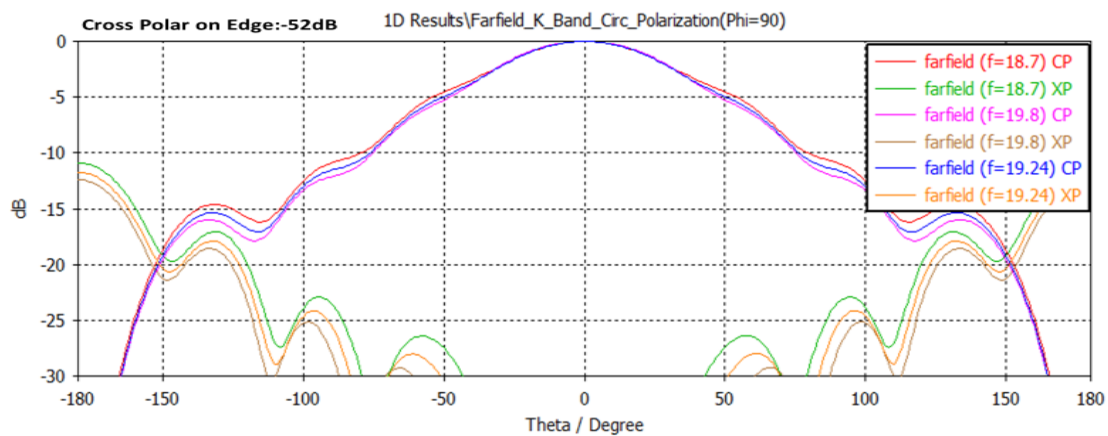
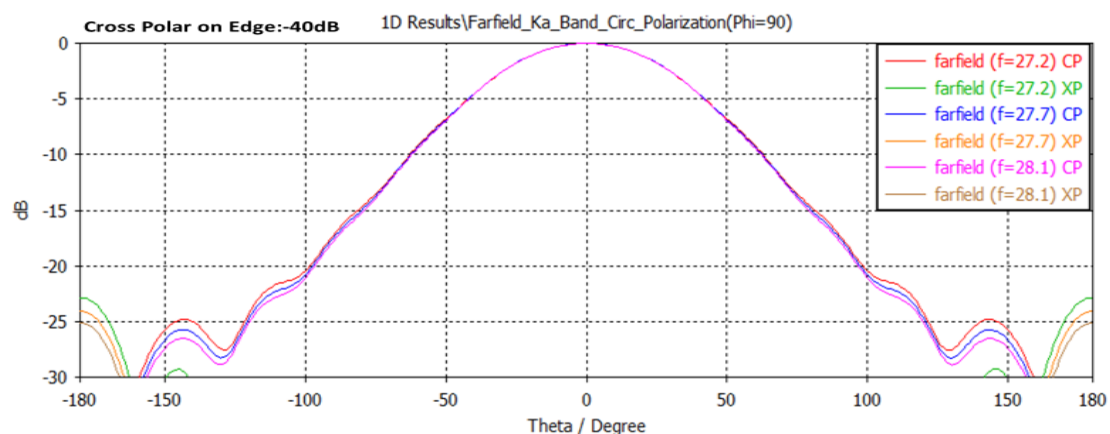
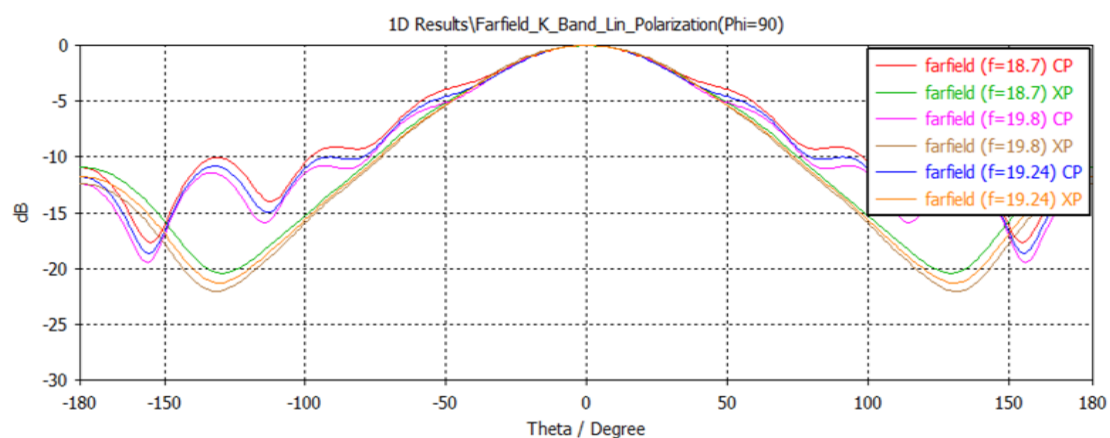


Figura 3-21: Campo lejano Banda K polarización circular a derechas del elemento final (Phi = 90°)

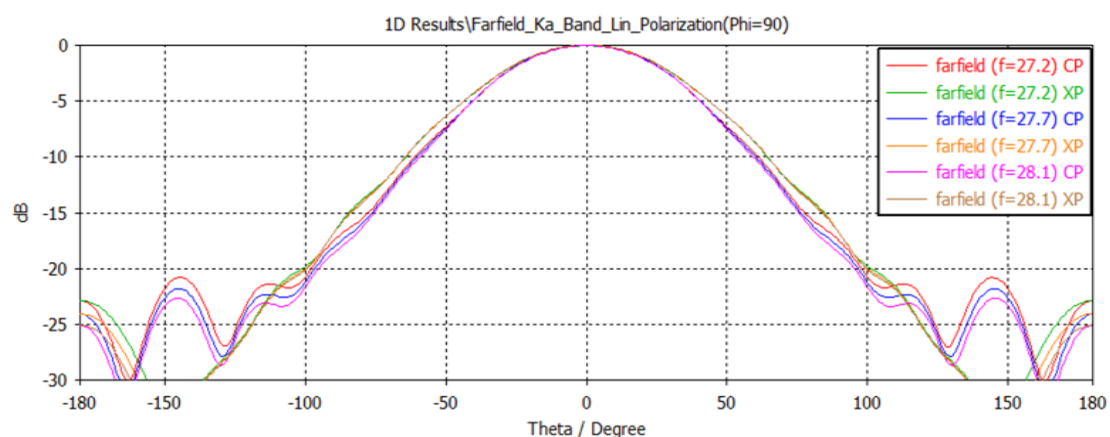




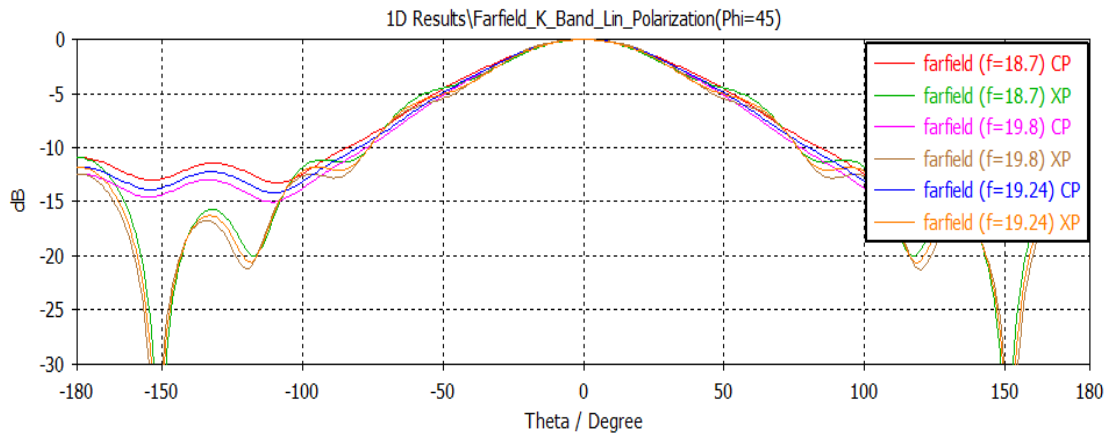
**Figura 3-22: Campo lejano Banda Ka polarización circular a derechas del elemento final ( $\Phi=90^\circ$ )**



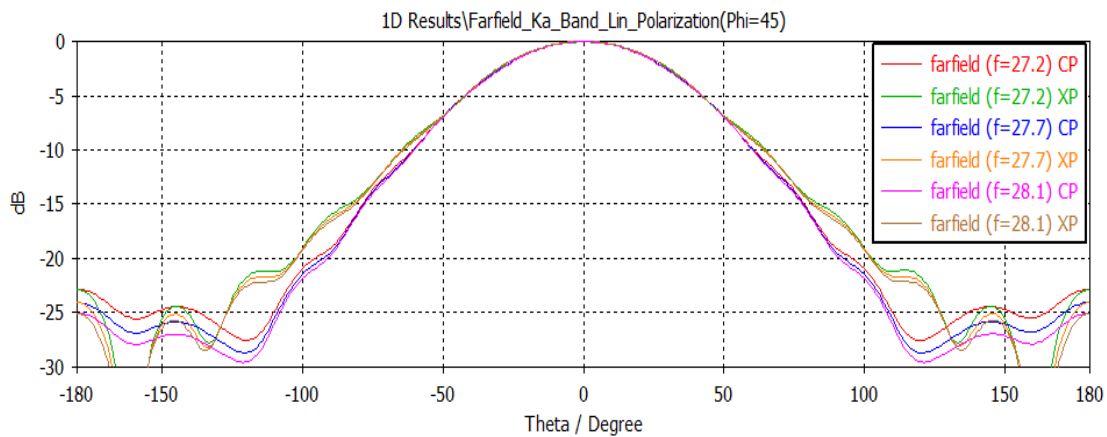
**Figura 3-23: Componentes Co-polar y Contra-polar del ampo lejano Banda K polarización lineal del elemento final ( $\Phi = 90^\circ$ )**



**Figura 3-24: Componentes Co-polar y Contra-polar del ampo lejano Banda Ka polarización lineal del elemento final ( $\Phi = 90^\circ$ )**



**Figura 3-25: Componentes Co-polar y Contra-polar del ampo lejano Banda K polarización lineal del elemento final (Phi = 45°)**



**Figura 3-26: Componentes Co-polar y Contra-polar del ampo lejano Banda Ka polarización lineal del elemento final (Phi = 45°)**

Cuyos valores de directividad y anchos de haz a -3dB se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 7 : Directividad y ancho de haz para el elemento final.**

Frecuencia[GHz]	Directividad[dBi]	$\Delta\theta_{-3dB}[^\circ]$
18.7	7.4	72.5
19.2	7.7	69.8
19.8	7.9	70.2
27.2	9.3	64.8
27.7	9.3	65.1
28.1	9.4	64.9

A la vista de los resultados, este resulta ser el elemento más completo de los 3 diseñados, ya que se obtienen unos valores de adaptación que entran dentro de las bandas tanto K como Ka, no con una gran adaptación en esta última, pero se consiguen unos resultados de relación axial bastantes positivos.

Por otro lado, cabe destacar que este diseño es realizable en cuanto a dimensiones físicas por la tecnología disponible. Esto es, por ejemplo, que el espesor y separación mínimo entre pistas debe ser 0.1mm.

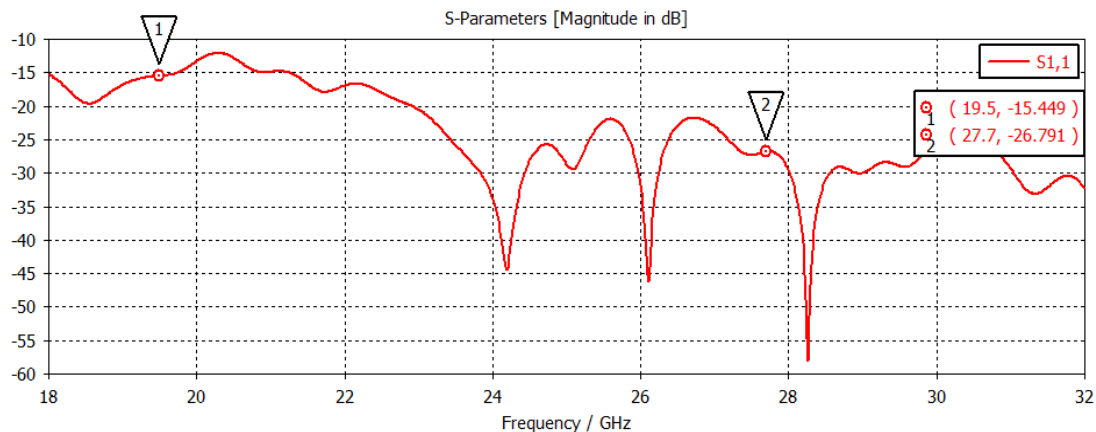
## 4 Red de Alimentación

Una vez finalizado el diseño del elemento radiante bajo estudio, abordaremos el diseño de la red de alimentación. Para realizar el diseño de dicha red, hemos hecho uso del software ADS (Advanced Design System), la tecnología seleccionada es Stripline, ya que nos permite un mayor aislamiento. Posteriormente, y como parte de las líneas futuras de trabajo, se implementará el diseño en el programa de CST para su optimización con simulaciones EM que nos permitan tomar en cuenta otros factores tales como las corrientes que se propagan dentro de la estructura multicapa, los acoplos y otros, que modifican el comportamiento y las prestaciones de la red de alimentación diseñada.

### 4.1 Alimentación del elemento radiante

En este apartado vamos a plantear la forma de alimentar el elemento con la red diseñada.

La manera que hemos planteado de alimentar el elemento, ha sido mediante acoplo por una ranura con stubs, este tipo de alimentación nos da una mayor flexibilidad en cuanto a la posición donde tenemos que colocar los terminales de conexión evitando una fuente común de problemas en el diseño. A continuación, presentamos un ejemplo de la respuesta del parámetro S11 de un elemento radiante alimentado de esta manera.



**Figura 4-1: Ejemplo de respuesta del parámetro S11 del alimentador para el elemento radiante**

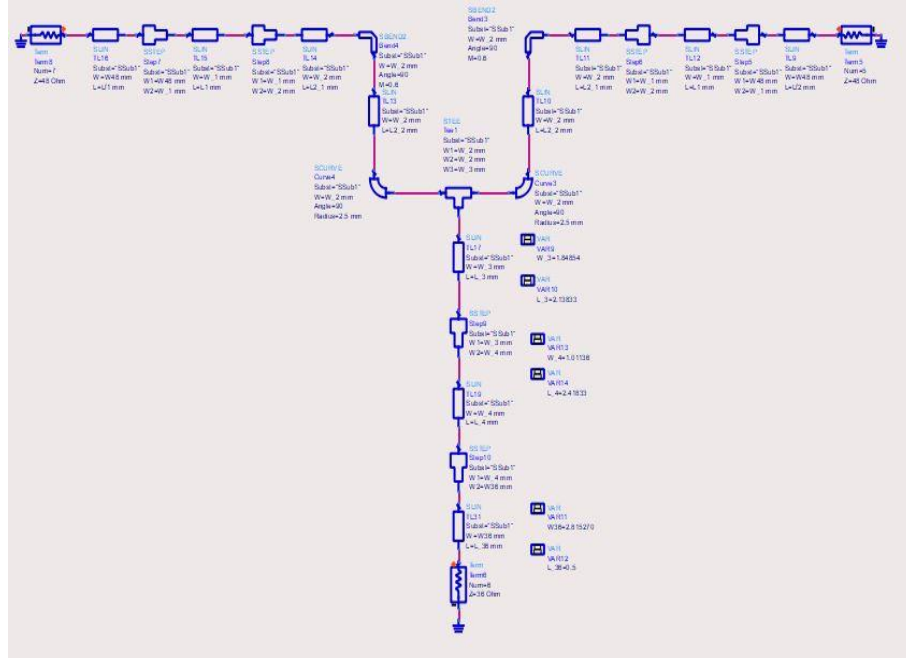
Como observamos en ambas bandas estamos en un valor de adaptación mejor a  $\leq -15$ dB, sobre todo en la banda Ka se obtiene una buena adaptación en toda la banda, este es un punto a mejorar en trabajos futuros para la banda K, pero para este trabajo estos resultados son válidos.

### 4.2 Componentes de la red de alimentación propuesta

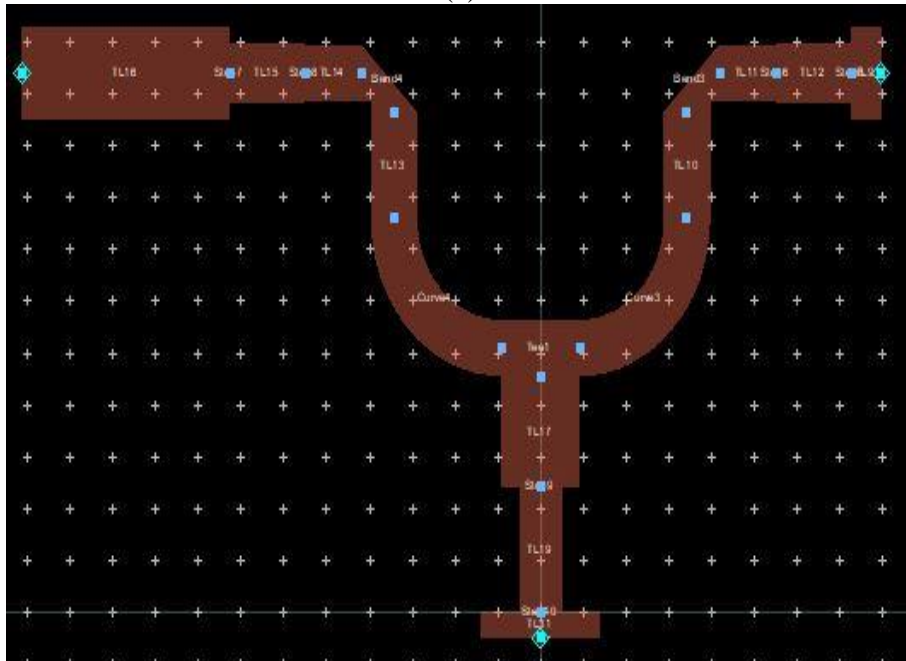
En este apartado se presentan diferentes componentes de la red que podrían emplearse con el elemento, cada uno con diferentes características, el alimentador tiene 4 puertos, a través de los cuales se conecta la red.

### 4.2.1 Red de alimentación banda K

La primera red que se diseña es para la banda de recepción, se propone el uso de una red que desfase entre sus puertos de  $180^\circ$  con un rizado en fase menor a  $5^\circ$ . El esquemático de ADS y el layout del diseño del divisor se presenta a continuación.



(a)



(b)

**Figura 4-2: Red de alimentación banda K: a) Esquemático de ADS, y b) Layout**

El diseño que hemos propuesto es el más simple posible, aprovechando que si tomamos en cuenta cada banda por separado su porcentaje de ancho de banda es bajo ( $\sim 3.4\%$ ), con divisores de potencia simétricos, aunque con desfases muy diferentes. Por otro lado, hacemos uso de una unión en T circular que nos proporciona una mejora respecto al ancho

de banda. Con este componente de la red buscamos tener un desfase entre los dos puertos de  $180^\circ$  en la banda de trabajo.

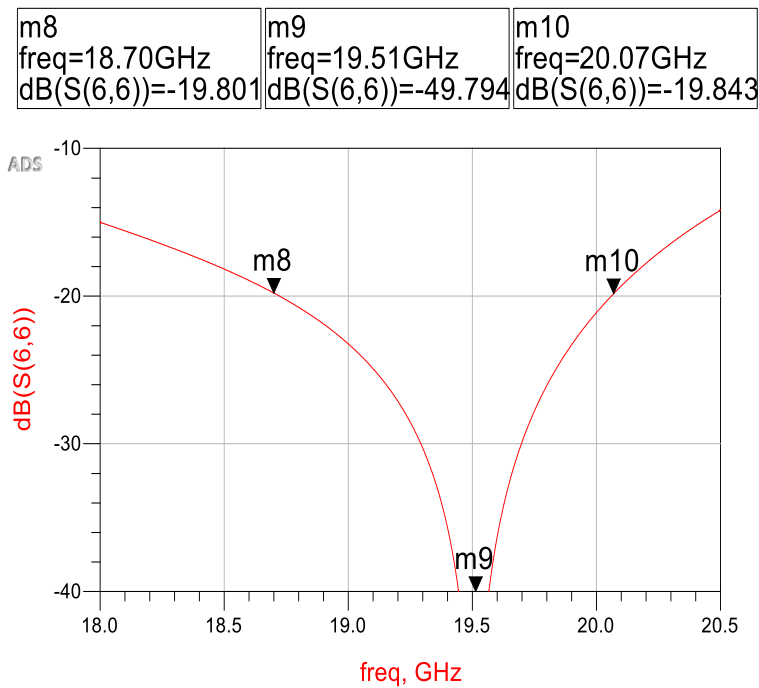


Figura 4-3: S11 red banda K

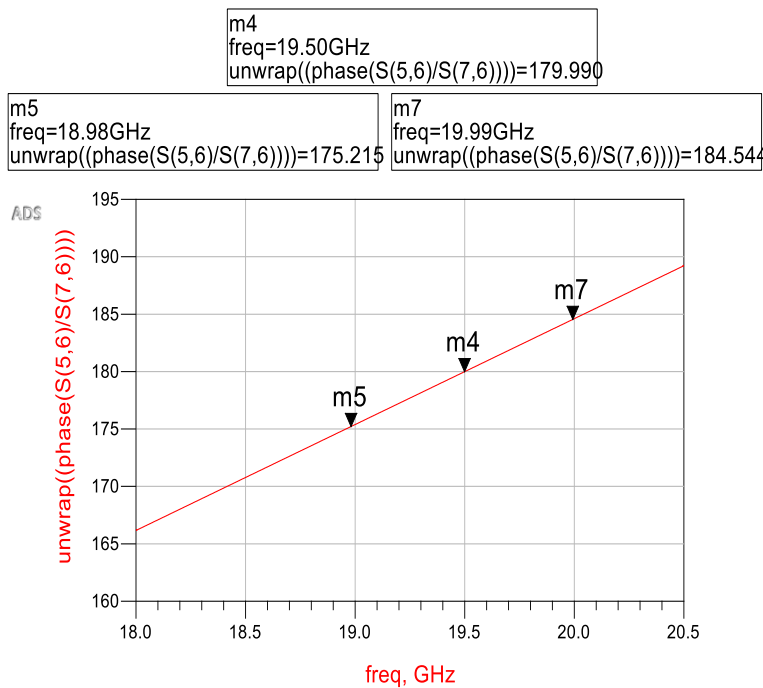
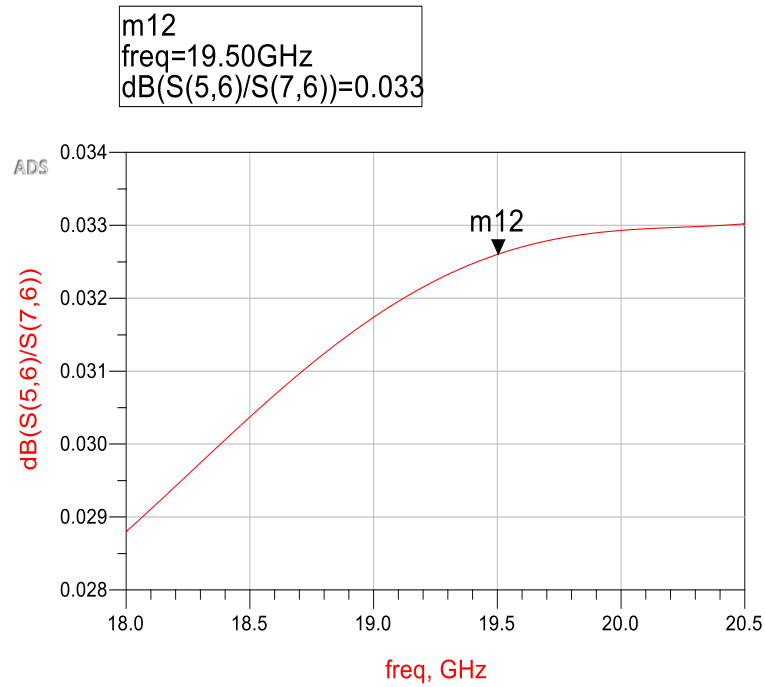


Figura 4-4: Fase red banda K

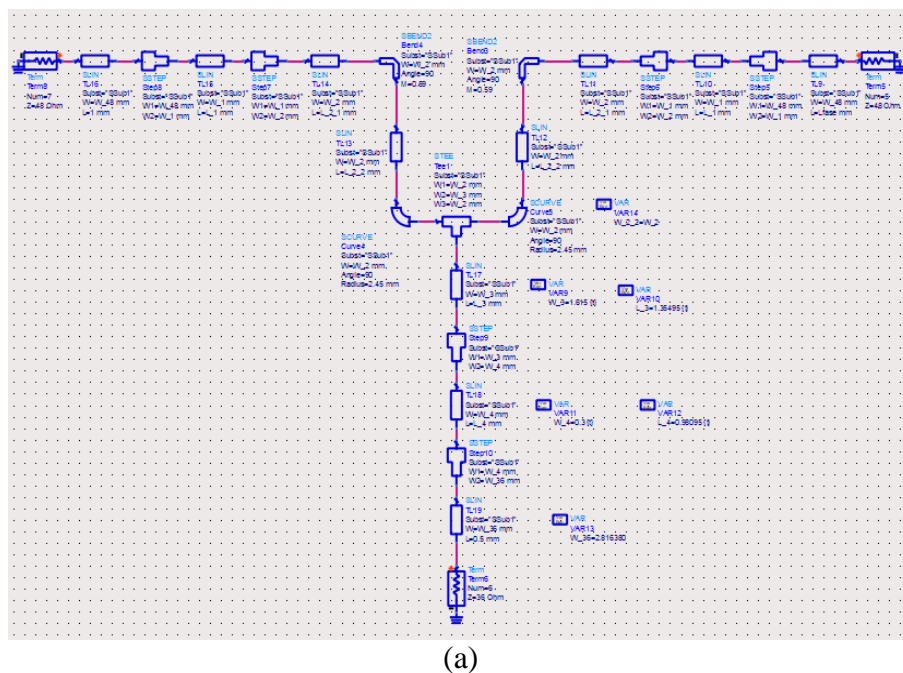


**Figura 4-5: Relación de potencia en los dos puertos de la red K**

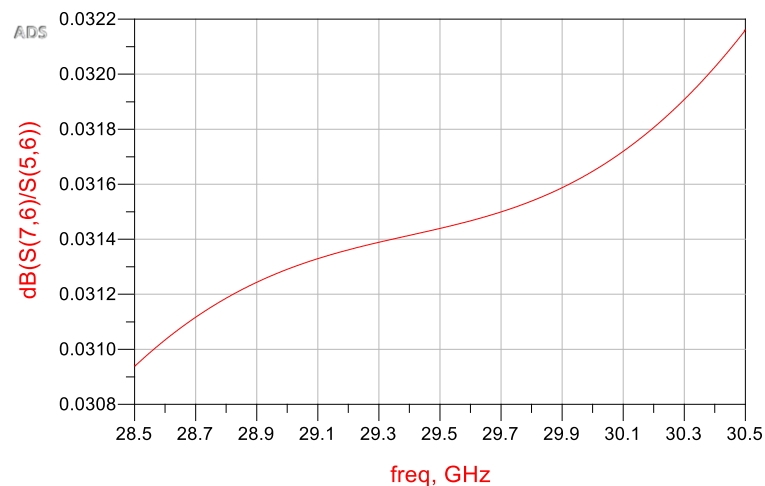
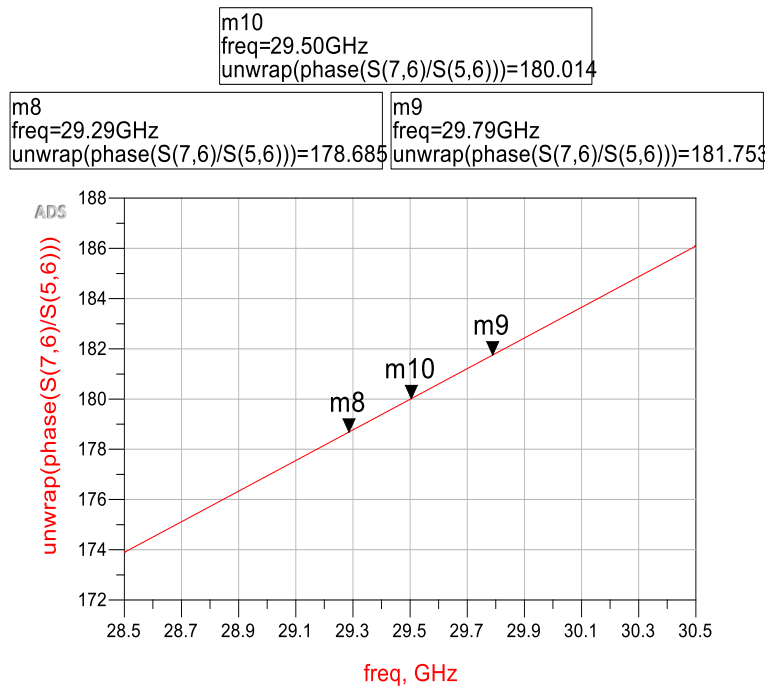
Como observamos en las figuras anteriores, tenemos una adaptación mejor de -20dB entre 18.7GHz y 20.1GHz, y mantenemos un desfase de  $180^\circ \pm 5^\circ$ , con lo que cubrimos la banda K en la que estamos trabajando con el elemento unitario, y la relación de potencia se mantiene en torno a 0dB, con lo que ambos puertos están recibiendo la misma porción de potencia de la red.

#### 4.2.2 Red de alimentación banda Ka

Del mismo modo que hemos creado la red para la banda K, proponemos una red para la banda Ka, con un desfase entre puertos de  $180^\circ$  con un rizado en fase menor a  $5^\circ$ . El esquemático de ADS y el layout del diseño del divisor se presenta a continuación.







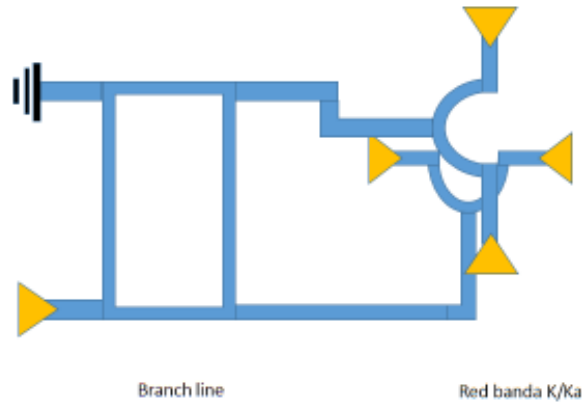
### 4.2.3 Configuraciones de las Redes

Una vez que tenemos los diseños de los divisores de potencia, hemos planteado dos posibles configuraciones para la red de alimentación del elemento radiante con acoplo por ranura.

#### 4.2.3.1 Configuración 1

En la primera configuración que hemos estudiado sería necesario el desarrollo de un Branch line de  $90^\circ$ , tanto para la banda K, como para la banda Ka, así utilizando dos veces la misma red, conseguimos alimentar el elemento en la banda deseada en 4 fases ( $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ ), consiguiendo una simetría de radiación en la banda a utilizar, para poder utilizar esta configuración sería necesario realizar los Branch line de cada banda.



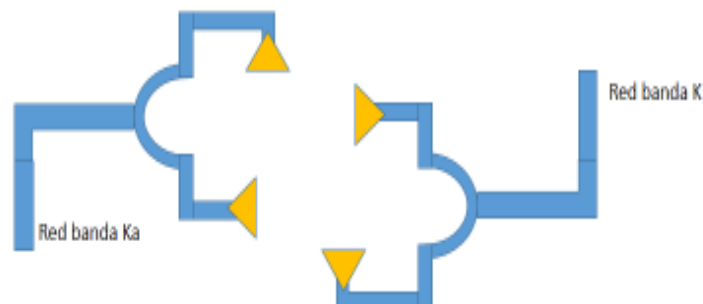


**Figura 4-10: Ejemplo esquemático alimentación configuración 1**

#### **4.2.3.2 Configuración 2**

Para la segunda configuración, se estudia la posibilidad de realizar una alimentación en doble banda, es decir, al tener cuatro puertos para alimentar, utilizamos dos de ellos para la banda K, y dos de ellos para la banda Ka, así podemos utilizar el elemento para transmitir y recibir señal de forma simultánea, la pega de esta configuración es que se pierde la simetría de radiación, pero se consigue aprovechar más las características del elemento.

Por tanto, tenemos en este punto tenemos una red de alimentación para un elemento unitario con polarización circular a derechas, en el caso de querer tener una polarización circular a izquierdas, se debería implementar en otra capa del sistema.

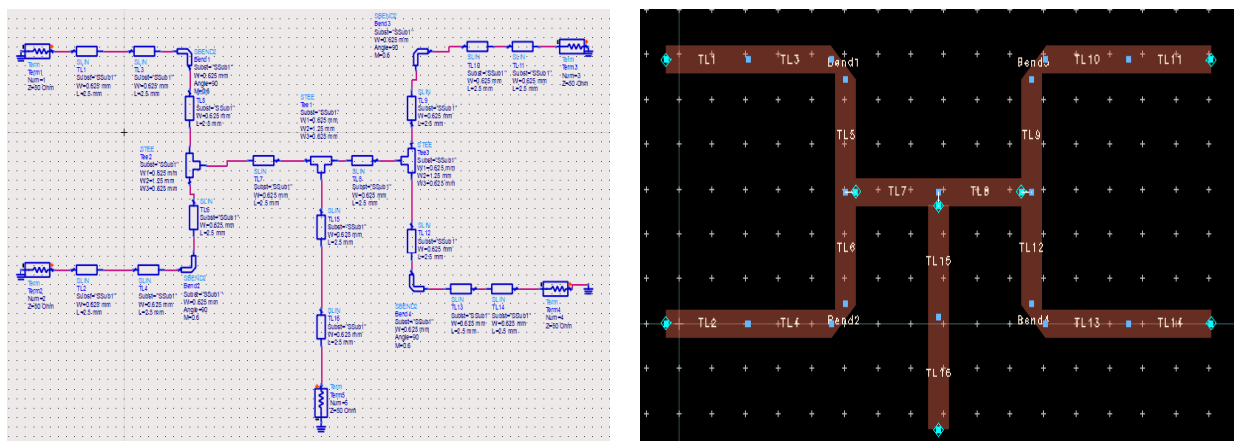


**Figura 4-11: Ejemplo esquemático alimentación configuración 2**

### **4.3 Alimentación de Array**

Para el caso de manejar un array o sub-array pasivo y modular (para ser utilizado en sistemas de mayor apertura y/o complejidad) como se explica en los objetivos del TFG, simplemente bastaría con realizar el diseño de una red de alimentación a partir de los prototipos de red ya creados en la sección anterior. A continuación, planteamos dos posibles prototipos de red de alimentación para un sub-array 4 elementos.

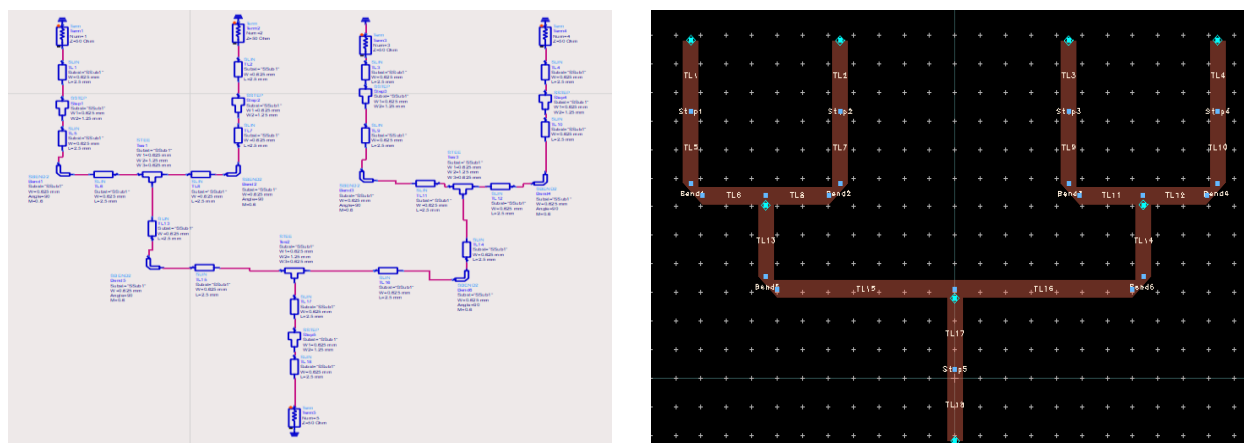
Para un sub-array plano de 4 elementos (2x2) plantearíamos una red con tres divisores de potencia, similar a la que se muestra a continuación.



**Figura 4-12: Prototipo de alimentación para un array planar**

En los puertos de conexión conectaríamos las redes de alimentación del elemento unitario, generando así la red de alimentación de un array planar.

Para un sub-array lineal de 4 elementos plantearíamos una red con tres divisores de potencia, similar a la que se muestra a continuación.



**Figura 4-13: Prototipo de alimentación para un array lineal**

Estos prototipos están basados en los diseños llevados a cabo en las asignaturas de Medios de transmisión y Antenas y compatibilidad electromagnética respectivamente, que se presentaban como un divisor de potencia y una red de alimentación para un array lineal.

A estos dos prototipos se le deberían añadir amplificadores activos para subsanar las pérdidas introducidas por dichas redes.

## 5 Conclusiones

---

Con el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado, se ha investigado y profundizado sobre diferentes conceptos, componentes, tecnologías y diseños de elementos radiantes para su implementación en array de antenas. Además, se ha profundizado en el manejo de herramientas de diseño, particularmente en la utilización de los programas comerciales ADS y CST.

En cuanto al elemento radiante unitario, hemos utilizado filtros iris, observando como el añadir secciones resonantes mejora el ancho de banda de adaptación, y como el ancho de banda y así la relación axial, mejoran considerablemente cuando se utilizan elementos formados por secciones de tipo C, también se puede destacar las dificultades de trabajar con más de un 30% de ancho de banda, como puede ser el requerido para trabajar con las bandas K y Ka, y por tanto poder obtener un elemento multibanda.

En el diseño final obtenido hemos conseguido mejorar dos aspectos importantes respecto al estado del arte actual, estos parámetros mejorados han sido lograr un elemento de doble banda con una única apertura, y obtener una relación axial menor a 2dB para un rango de exploración de  $-90^\circ$  a  $90^\circ$  en Theta. Por último, mencionar que el diseño alcanzado finalmente es realizable, con la tecnología fabricación por mecanizado y circuitos impresos, que tenemos disponible en el estado actual de la técnica.

Es importante destacar que, para poder realizar un array de antenas partiendo de unas especificaciones de banda de frecuencia y aplicación, de las cuales se han derivado las especificaciones del elemento radiante, debíamos partir por la propuesta de diseño del elemento radiante definiendo entonces como sería la alimentación del mismo. Por otro lado, entendemos fundamental en la red de alimentación del array pasivo, la red de alimentación del elemento radiante en sí, con lo que se presta especial atención a estos dos componentes del array. Por último, teniendo menos complejidad la red de alimentación para sub-arrays y su formación modular en conjuntos más grandes para mayores aperturas, se presentó la estrategia a seguir para conformar la red de alimentación necesaria.

## 6 Líneas futuras

---

En esta sección, basado en los resultados obtenidos y las necesidades de mejora detectadas, se proponen diferentes líneas de trabajo futuro que se presentan a continuación:

1. Respecto al diseño ya alcanzado, el próximo paso que se puede realizar es integrar el diseño completo del elemento con la red de alimentación utilizando CST.
2. Completar el diseño de la red de alimentación e integración con un elemento radiante, realizar su fabricación, y comprobar sus prestaciones.
3. Como paso siguiente, se propone continuar el diseño de un sub-array en modo de demostrador, su fabricación y realizar la campaña de medidas en el laboratorio y cámara anecoica para la verificación de prestaciones.
4. Se propone mejorar las prestaciones de la etapa del filtro en cuanto a adaptación y ancho de banda. Para ello, se puede estudiar como optimizar la propuesta actual u optar por otras técnicas de filtrado.



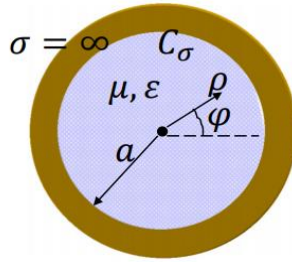
## Referencias

---

- [1] «DUAL BAND PHASED ANTENNA ARRAY USING WIDEBAND ELEMENT WITH DIPLEXER».
- [2] S. M. I. Q. M. I. C. M. C. W. J. X. J. L. C. W. K. Z. a. S. Z. M. I. F. Qin, «A Simple Low-Cost Shared-Aperture Dual-Band Dual-Polarized High Gain Antenna for Synthetic Aperture Radars,» 2016.
- [3] S. M. I. R. L. S. M. I. L. Y. T. W. W. H. A. M. I. a. M. T. F. I. Krishna Naishadham, «A Shared-Aperture Dual-Band Planar Array With Self-Similar Printed Folded Dipoles,» 2013.
- [4] P. C. Strickland, ««POLARIMETRIC DUAL BAND RADIATING ELEMENT FOR SYNTHETIC APERTURE RADAR»». Unated States of America Patente 5.952.971, 14 sep 1999..
- [5] J. S. S. y. J. R. M. Przemyslaw Gorski, « «Wideband, Low Profile and Circularly Polarized K/Ka Band Antenna»,» de *IEEE European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 1, 2015.
- [6] C. A. L. Sevillano, «Contribution to the Analysis of Waveguides and Design of Passive Components at Millimeter and Submillimeter-Waves,» Madrid, 2014.
- [7] M. A. S. Natera, *Ku-Band MSAT feed horn mast TM01 mode filter analysis*, Madrid, 2017.
- [8] J. C. Ortega, «Filtros para Radiofrecuencia,» Madrid.
- [9] J. A. R. Cruz, *CIRCUITOS CON LÍNEAS DE TRANSMISIÓN. ADAPTACIÓN DE IMPEDANCIAS.*, Madrid, 2014-15.
- [10] J. A. R. Cruz, «CIRCUITOS CON LÍNEAS DE TRANSMISIÓN. ADAPTACIÓN DE IMPEDANCIAS.,» 2014.
- [11] J. L. M. Campos, «CONCEPTOS BÁSICOS DE ANTENAS (FUENTES INTERFERENTES RADIADAS)».
- [12] S. M. I. S. C. R. C. S. M. I. P. B. Raymond Dickie, «Low-Pass FSS for 50–230 GHz Quasi-Optical Demultiplexing for the MetOp Second-Generation Microwave Sounder Instrument,» 2017.
- [13] J. A. R. Cruz, «GUÍA DE ONDA CIRCULAR,» de *ESTUDIO PARTICULAR DE DISTINTOS MEDIOS DE TRANSMISIÓN:MODOS DE PROPAGACIÓN MÁS HABITUALES EN CADA MEDIO*, Madrid, 2015.
- [14] J. A. R. Cruz, *TEMA I. LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DESDE EL PUNTO DE VISTA CIRCUITAL.*, Madrid, 2015.
- [15] A. S. E. A. G. A. L. B. E. M. V. Ziegler, «Radiating Elements for Shared Aperture Tx/Rx Phased Arrays at K/Ka Band,» 2016.

# Anexos

## A Guía de onda circular



**Figura 0-1: Estructura Guía de onda circular [13].**

En este anexo vamos a presentar las ecuaciones de guía de onda circular que hemos utilizado para calcular las dimensiones de la cavidad que hemos utilizado para el elemento radiante.

En una guía de onda circular se propagan dos tipos de modos TE y TM [13], siendo el modo  $TE_{11}$  el modo fundamental dentro de la guía y el  $TM_{01}$  el primer modo superior. Para obtener las frecuencias de corte de cada modo tenemos las siguientes tablas y ecuaciones:

Si queremos analizar los modos TE la tabla es la siguiente:

**Tabla 8 : Valores de  $p'_{mn}$  para modos TE en guía circular.**

m	$p'_{m1}$	$p'_{m2}$	$p'_{m3}$
0	3.832	7.016	10.174
1	1.841	5.331	8.536
2	3.054	6.706	9.970

Estos valores de la tabla son las soluciones para el modo TE de las funciones de Bessel de segunda especie [13].

Con estos valores podemos obtener las frecuencias de corte del modo fundamental y los modos superiores dentro de la guía, mediante la siguiente ecuación [13]:

$$f_c|_{TE_{mn}} = \frac{p'_{mn}}{2\pi a \sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2)$$

De este modo si queremos tener una frecuencia de corte del modo fundamental, basta con despejar el valor del radio de la ecuación anterior.

Este mismo estudio se realiza para los modos TM que se propagan dentro de la guía, con la siguiente tabla y ecuación:

**Tabla 9 : Valores de  $p'_{mn}$  para modos TM en guía circular.**

m	$p_{m1}$	$p_{m2}$	$p_{m3}$
0	2.405	5.520	8.654
1	3.832	7.016	10.174
2	5.135	8.417	11.620

Estos valores de la tabla son las soluciones para el modo TM de las funciones de Bessel de segunda especie [13].

Con estos valores podemos obtener las frecuencias de los modos superiores dentro de la guía, mediante la siguiente ecuación [13]:

$$f_c|_{TM_{mn}} = \frac{p_{mn}}{2\pi a \sqrt{\mu\epsilon}} \quad (3)$$

Así con el uso de las dos ecuaciones podemos hacer un estudio de cual debe ser el radio para tener el modo fundamental en cierta frecuencia y sabiendo el rango que manejamos cuantos modos se propagan.



## **B Adaptadores $\lambda/4$**

En una línea de transmisión podemos obtener la impedancia que tiene en cualquier punto, esta impedancia se obtiene de la siguiente manera [14]:

$$Z(-d) = Z_0 \frac{Z(0) \cosh(\gamma d) + jZ_0 \sinh(\gamma d)}{Z_0 \cosh(\gamma d) + Z(0) \sinh(\gamma d)} \quad (4)$$

Que si consideramos sin pérdidas dicha línea se simplifica a:

$$Z(-d) = Z_0 \frac{Z(0) \cos(\beta d) + jZ_0 \sin(\beta d)}{Z_0 \cos(\beta d) + Z(0) \sin(\beta d)} \quad [14]$$

Donde  $Z_0$  es la impedancia intrínseca de la línea de transmisión bajo estudio, y  $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ , si logramos tener una línea con una longitud  $d = \frac{\lambda}{4}$ , entonces obtenemos que la impedancia intrínseca de la línea resulta ser:

$$Z_0 = \sqrt{Z(0)Z(-d)} \quad [14]$$

Con lo que se logra adaptar dos impedancias reales, o transformar desde una impedancia real a otra impedancia real que convenga más al diseño bajo estudio.

Basta con tener una línea de transmisión de una longitud  $\frac{\lambda}{4}$  y una impedancia intrínseca de valor  $\sqrt{Z(0)Z(-d)}$  para lograr adaptar dos impedancias reales diferentes.